

# **AVAS im Straßenverkehr – Untersuchungen zur Wirkung und Bewertung aktueller AVAS-Implementierungen**

## **AVAS in road traffic - Studies on the effect and evaluation of current AVAS implementations**

---

André Fiebig, Christian Hittmann, Wael Yahya

<http://dx.doi.org/10.25673/103511>

### **Abstract**

Sales of hybrid and electric vehicles are steadily increasing due to current technological, social and political developments. With regard to the interior and exterior noise of vehicles with electric drives, considerable efforts have been made in recent years to reflect customer preferences as best as possible and to implement suitable vehicle noises. While the interior noise must convey driving dynamics acoustically and avoid disturbing noises, which are becoming increasingly critical due to the elimination of the combustion engine, the focus in the design of exterior noise is on AVAS (Acoustic Vehicle Alerting System), which can be individually designed by manufacturers within the range of legal requirements and thus can convey brand characteristics. Based on an online survey and a listening experiment, different AVAS implementations were evaluated and the meaning of AVAS was explored in more detail. Basically, an online survey showed that AVAS is considered by many to be essential for increasing pedestrian safety and would also be taken into account in potential purchases. In many cases, the respondents described situations in which electric vehicles were not heard due to the lack of AVAS, which promoted the general rather positive attitude of the respondents to the necessity of AVAS. However, the majority of respondents still believe that there will be an increase in noise pollution. Here, especially the louder and more tonal AVAS signals were rated as less pleasant. To investigate the effect of AVAS in road traffic situations near intersections, a measurement campaign was performed and the resulting scenarios, which were also recorded analogously with combustion engine motor vehicles, were evaluated in a listening experiment with regard to loudness, annoyance and conspicuousness. It was found that the scenarios with purely electric vehicle traffic were on average about 5 dB quieter. However, the reduction in annoyance compared to scenarios with internal combustion engine vehicles corresponds exclusively to the reduction in loudness or sound pressure level. An additional increase or decrease in annoyance due to AVAS beyond the change in loudness could not be observed. Thus, it can be assumed that the determination of the increase disturbance effect of road traffic noise near intersections might be relevant for electric vehicles as well in accordance with RLS-19.

### **Kurzfassung**

Der Absatz von Hybrid- und Elektrofahrzeugen nimmt aufgrund aktueller technologischer, sozialer und politischer Entwicklungen stetig zu. Bezüglich des Innen- und Au-

ßengeräusches von Fahrzeugen mit Elektroantrieb wurden in den letzten Jahren erhebliche Anstrengungen unternommen, Kundenpräferenzen bestmöglich abzubilden und geeignete Fahrzeuggeräusche umzusetzen. Gilt es beim Innengeräusch akustisch Fahrdynamik zu vermitteln sowie Störgeräusche zu vermeiden, die aufgrund des Wegfalls des Verbrennungsmotors zunehmend kritisch sind, liegt der Fokus bei der Gestaltung des Außengeräusches auf AVAS (Acoustic Vehicle Alerting System), dass von Herstellern trotz gesetzlicher Vorgaben individuell gestaltet werden und damit Markenkennwerte vermitteln kann. Auf Basis einer Online-Umfrage und eines Hörexperimentes wurden verschiedene AVAS-Implementierungen evaluiert und die Bedeutung von AVAS näher exploriert. Grundsätzlich zeigte sich in einer Online-Befragung, dass AVAS von vielen als wesentlich zur Erhöhung der Fußgängersicherheit eingeschätzt wird sowie auch beim potenziellen Kauf berücksichtigt würde. Dabei wurden vielfach Situationen von den Befragten geschildert, in denen aufgrund vom fehlendem AVAS-Elektrofahrzeuge überhört wurden, wodurch die generelle eher positive Einstellung der Befragten zur Notwendigkeit von AVAS gefördert wurde. Dennoch geht die Mehrheit der Befragten von einer erhöhten Lärmbelastung aus. Hierbei wurden vor allem die lautereren und tonaleren AVAS-Signale als weniger angenehm eingeschätzt. Zur Untersuchung der Wirkung von AVAS in Straßenverkehrssituationen im Bereich von Kreuzungen wurde eine Messkampagne umgesetzt und die resultierenden Szenarien, die analog ebenfalls mit Kraftfahrzeugen mit Verbrennungsmotor aufgezeichnet wurden, in einem Hörexperiment hinsichtlich der Lautheit, Lästigkeit und Auffälligkeit bewertet. Es zeigte sich, dass die Szenarien mit reinem Elektrofahrzeugverkehr im Mittel ca. 5 dB leiser waren. Die Verringerung der Lästigkeit im Vergleich zu Szenarien mit Kraftfahrzeugen mit Verbrennungsmotor entspricht jedoch nahezu ausschließlich der Reduktion der Lautheit bzw. des Schalldruckpegels. Eine zusätzliche Erhöhung oder auch Verringerung der Lästigkeit durch AVAS-Geräusche über die Veränderung der Lautstärke des Verkehrsgeräusches hinaus, konnte nicht beobachtet werden. Dadurch kann angenommen werden, dass bei der Ermittlung der Störwirkung von Straßenverkehrsgeräuschen auch bei Elektrofahrzeugen von einem Kreuzungszuschlag ausgegangen werden muss, vergleichbar mit der aktuellen Regelung in der RLS-19.

## **1. Elektrofahrzeuge und AVAS – Eine Einleitung**

Hybridelektrofahrzeuge (HEV) und vollelektrische Fahrzeuge (EV) werden aufgrund ökologischer Motive, technologischer Entwicklungen, steigender Kraftstoffpreise fossiler Brennstoffe und gesetzlicher Vorschriften und Normen wie den europäischen Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen zur Verringerung der Kohlendioxid-Emissionen immer beliebter. Öffentliche Kaufanreize fördern zusätzlich den Verkauf von Elektrofahrzeugen. Aktuelle Verkaufszahlen und Prognosen deuten darauf hin, dass die jährlichen Verkäufe von Elektrofahrzeugen in den kommenden Jahren deutlich steigen werden und damit auch der Anteil der Elektrofahrzeuge an der Gesamtflotte. Obwohl das genaue Wachstum des EV-Marktes nicht genau vorhergesagt werden kann, da dies auch von politischen Entscheidungen kurzfristig massiv beeinflusst wird, gibt es jedoch keine Vorhersagen, die den steigenden Marktanteil von Elektrofahrzeugen in Frage stellen würden. Weltweit gab es im Jahr 2021 über 17 Millionen Elektrofahrzeuge, über sechs Millionen Fahrzeuge mehr als noch im Vorjahr [1]. Damit machen Elektrofahrzeuge (Batterie-Elektrofahrzeugen (BEV) und Plug-In-Hybrid (PHEV)) in Deutschland im Jahr 2023 einen Anteil am Bestand der Personenkraftwagen von knapp 4% aus [2]. Die Zahl an Neuzulassungen von Elektroautos (rein elektrisch und

Plug-In-Hybrid) in Deutschland stieg von knapp 100.000 im Jahr 2019 auf über 800.000 Neuzulassungen im Jahr 2022.

Da die Antriebstechnologie der Elektrofahrzeuge zu geringeren Geräuschemissionen führt, erhofft man sich mit der zunehmenden Verdrängung des Verbrennungsmotors (Internal Combustion Engine (ICE)) auch eine merkliche Reduzierung von belästigenden Straßenverkehrsgeräuschen. Straßenverkehrslärm ist nach wie vor größte Geräuschquelle für Lärmbelästigung. So leben beispielsweise mehr als 100 Millionen Menschen in Europa in Gebieten, in denen die Belastung durch Straßenverkehrslärm als gesundheitsschädlich gilt [3]. Darüber hinaus schätzt die Weltgesundheitsorganisation, dass allein in Westeuropa derzeit jedes Jahr über eine Million gesunde Lebensjahre durch Straßenverkehrslärm verloren gehen [4].

Mit dem Aufkommen von Elektrofahrzeugen waren Hoffnungen für eine Reduktion des Straßenverkehrslärms um einige dB zumindest für niedrige Geschwindigkeiten verbunden, was ein erhebliches Potenzial zur Verringerung der gesundheitlichen Beeinträchtigungen bedeuten würde [5]. Ein noch größeres Potenzial zur Lärminderung besteht sogar noch in Gebieten mit einer großen Anzahl an motorisierten Zweikraftfahrzeugen. In diesen Gebieten könnte mit dem Austausch von motorisierten Zweikraftfahrzeugen durch Elektroräder die Lärmbelästigung erheblich reduziert werden (vgl. [6]).

Mit dem Aufkommen von Elektrofahrzeugen wuchs gleichzeitig vor allem bei Blinden- und Sehbehindertenverbänden die Sorge, dass Elektrofahrzeuge eine erhöhte Gefahr für Fußgänger darstellen könnten, insbesondere für diejenigen vulnerablen Gruppen, die verstärkt auf das Gehör angewiesen sind [7]. So hat sich die Europäische Blindenunion (EBU) dafür eingesetzt, dass alle "geräuschlosen" Autos mit einem obligatorischen Geräusch ausgestattet werden [8]. Studien, die die Gefahr von Elektrofahrzeugen für Sehbehinderte untersuchten und auf der Analyse von Unfallstatistiken basierten, deuteten auf ein höheres Kollisionsrisiko hin [9], wurden jedoch methodisch häufig kritisiert [10]. Dies führte unmittelbar zu politischen Aktivitäten und nachfolgend Maßnahmen, um Regelungen zur Hörbarkeit von Elektrofahrzeugen aufzustellen und zu verabschieden. Insbesondere Blindenverbände wiesen darauf hin, dass sehbehinderte Fußgänger akustische Signale benötigen, um sich sicher im Verkehr bewegen zu können [8]. Studien zur Wirkung von künstlich erzeugten Geräuschen bei Elektrofahrzeugen zeigten erwartungsgemäß, dass Fahrzeuge mit zusätzlichen Geräuschen bereits in größerer Entfernung mittels Hörsinn erkannt werden können [11]. Dies führte dazu, dass Mindestanforderungen zur Hörbarkeit von Elektrofahrzeugen durch Verwendung von Alarmsignalen einschließlich der Definition notwendiger akustischer Merkmale gesetzlich verankert wurde. Dennoch gibt es bis heute eine Debatte darüber, wie Fußgängerschutz und Verkehrslärmvermeidung bestmöglich in Einklang gebracht werden können [12].

## **2. Elektrofahrzeuge und AVAS – Aktuelle Regelungen**

In der EU-Verordnung Nr. 540/2014 wird AVAS als ein System für Straßenverkehrsfahrzeuge mit Elektro-Hybrid- oder reinem Elektroantrieb definiert, das mittels eines Schallzeichens Fußgängerinnen und Fußgänger sowie andere Verkehrsteilnehmende auf die Anwesenheit des Fahrzeuges aufmerksam macht [13]. Insbesondere bei niedrigen Geschwindigkeiten bis rund 30 km/h würden die Schallemissionen eines Kraftfahrzeuges von den Antriebsgeräuschen dominiert, die bei Elektrofahrzeugen wegfielen. Daher würden bedeutende akustische Signalquellen für blinde und sehbehinderte

Verkehrsteilnehmende sowie Radfahrende weggefallen. Aus diesem Grund wären akustische Fahrzeug-Warnsysteme (AVAS) einzusetzen, wobei die allgemeine Geräuschbelastung für die Umwelt zu berücksichtigen sei. Daher müssen seit Juli 2021 Hersteller in allen neuen Hybrid- und reinen Elektrofahrzeugen ein AVAS einbauen, die die Anforderungen des Anhangs VIII bzw. der UNECE R 138 erfüllen [14]. Demzufolge muss im Elektromodus vom Anfahren bis mindestens zu einer Geschwindigkeit von 20 km/h sowie beim Rückwärtsfahren automatisch ein Schallzeichen erzeugt werden. Dabei muss AVAS jederzeit aktiv sein und darf nicht ausgeschaltet oder pausiert werden. Das Warngeräusch soll mit dem Geräusch eines Verbrennungsmotors der gleichen Klasse vergleichbar sein, dessen Schalldruckpegel jedoch bei gleichen Bedingungen nicht überschreiten. Die detaillierten akustischen Anforderungen wurden im Oktober 2016 in der UNECE R 138 und in der dazugehörigen Änderung UNECE R 138.01 (2017) definiert.

Ein AVAS müsste nicht betrieben werden, wenn die Gesamtpegelanforderungen (siehe Tab. 3) mit einer Toleranz von  $+3 \text{ dB(A)}$  eingehalten würden. Die Genehmigungsprüfung erfolgt bei Konstantfahrt mit  $10 \text{ km/h}$  und  $20 \text{ km/h}$ , wobei ein Gesamtschalldruckpegel erreicht sowie mindestens zwei Terzbänderpegel überschritten werden müssen (siehe Tab. 1). Mindestens eines dieser Terzbänder muss unterhalb der Terz mit einer Mittenfrequenz von  $1600 \text{ Hz}$  liegen oder dieser entsprechen.

**Tabelle 1:** Anforderungen an den Mindestschalldruckpegel über Terzbänder bei AVAS

Terzband (Mittenfrequenz) in Hz	Mindestpegel in dB(A) bei konstant 10 km/h	Mindestpegel in dB(A) bei konstant 20 km/h
160	45	50
200	44	49
250	43	48
315	44	49
400	45	50
500	45	50
630	46	51
800	46	51
1000	46	51
1250	46	51
1600	44	49
2000	42	47
2500	39	44
3150	36	41
4000	34	39
5000	31	36

Ferner müsse eine Frequenzverschiebung über die Veränderung der Geschwindigkeit informieren. Ein vom Fahrzeug abgegebener Ton müsse sich mit mindestens durchschnittlich  $0,8 \%$  in seiner Frequenz pro  $\text{km/h}$  proportional zur Geschwindigkeit verändern. Diese Veränderung muss bei Vorwärtsfahrt im Geschwindigkeitsbereich von  $5 \text{ km/h}$  bis  $20 \text{ km/h}$  erfolgen. Bei mehreren Frequenzverschiebungen muss nur eine Frequenzverschiebung zwingend die genannte Anforderung erfüllen. Im Stand ist es nach der UNECE R 138 nicht verpflichtend ein Warnsignal abzugeben. Ein Gesamtschalldruckpegel von  $75 \text{ dB(A)}$  in Abstand von  $2 \text{ m}$  darf generell nicht überschritten werden. Die verschiedenen Anforderungen an AVAS variieren weltweit. Tabelle 2 und 3 verdeutlichen wesentliche Unterschiede zwischen der europäischen und der amerikanischen Regelung [15] von akustischen Warnsignalen zur verbesserten Hörbarkeit

von Elektrofahrzeugen. Sind die Anforderungen an die geforderten Mindestgesamtpiegel verhältnismäßig vergleichbar (Tab. 3), so werden verschiedene Aspekte der Auslegung von AVAS in den Regelungen doch unterschiedlich ausgeführt, siehe Tab. 2 [16].

**Tabelle 2:** Vergleich der europäischen u. US-amerikanischen Vorschriften über AVAS-Anforderungen [16]

	Europa (UNECE-138.01)	USA (FMVSS Nr. 141)	
Geschwindigkeitsbereich (vorwärts)	bis 20 km/h ( $\pm 1$ km/h)	bis 30 km/h (+2 km/h)	
Rückwärtsfahrt	bis 6 km/h ( $\pm 2$ km/h)	0 km/h (stationär)	
Mindestterzpegel	verpflichtend	verpflichtend	
Frequenzbereich für Mindestterzpegel	2 Terzbänder im Bereich von 160 Hz - 5000 Hz	4 nicht benachbarte Terzbänder, die mindestens 9 Terzbänder umfassen (315 Hz - 5000 Hz)	2 nicht benachbarte Terzbänder (315 Hz - 3150 Hz)
Standgeräusch	nicht verpflichtend	verpflichtend	
Frequenzverschiebung	verpflichtend	nicht verpflichtend	

Der unterschiedliche Geschwindigkeitsbereich, die Anforderungen an ein zusätzliches Standgeräusch sowie die Forderung nach einer Frequenzverschiebung eines Tons verdeutlichen die unterschiedlichen Spezifikationen. Beispielsweise wird in der amerikanischen Regelung anstelle der Frequenzverschiebung eine relative Pegeländerung von +3 dB verlangt, um die Beschleunigung und Verlangsamung beim Übergang von einem relevanten Betriebszustand zum nächsten akustisch zu signalisieren, d.h. eine Pegelzunahme von +3 dB bei einer Geschwindigkeitszunahme von 10 km/h.

**Tabelle 3:** Vergleich der europäischen und US-amerikanischen Mindestanforderungen an AVAS bezüglich der Gesamtschalldruckpegel [16]

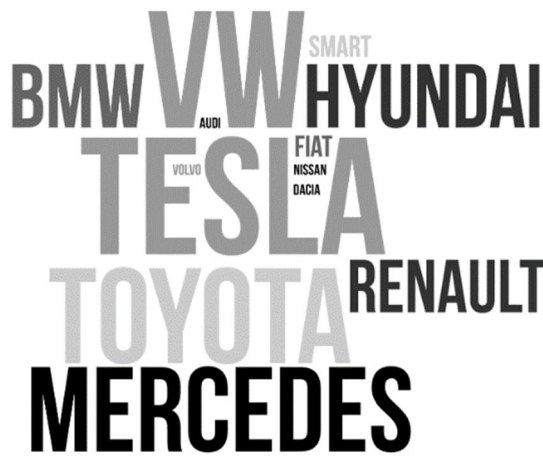
	Europe (UNECE-138.01)	USA (FMVSS Nr. 141) (Zweiband-Methode)
Konstantfahrt mit 10 km/h	50 dB(A)	51 dB(A)
Konstantfahrt mit 20 km/h	56 dB(A)	57 dB(A)
Konstantfahrt mit 30 km/h	-	62 dB(A)
Rückwärtsfahrt	47 dB(A)	48 dB(A)

Die Automobilhersteller können grundsätzlich individuelle AVAS-Auslegungen vornehmen, solange die gesetzlichen Anforderungen erfüllt sind. So sollen der breite Frequenzbereich und die flexible Auswahl möglicher Terzbänder den Herstellern die Flexibilität geben, Warngeräusche zu entwickeln, die für ihre Kunden akzeptabel sind [15].

### 3. AVAS – Befragung zur allgemeinen Akzeptanz

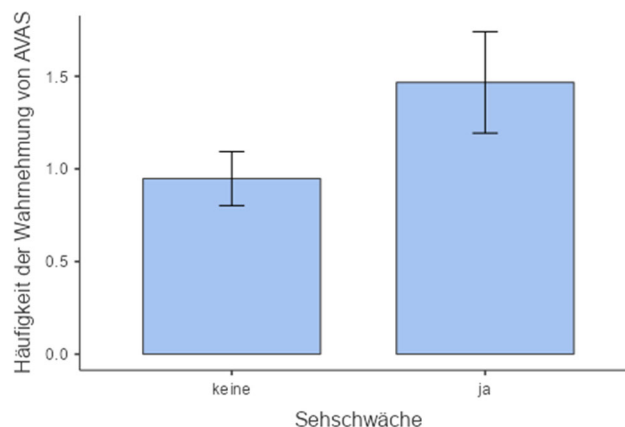
Im Rahmen einer Pilot-Online-Umfrage wurde die aktuelle Relevanz von AVAS thematisiert. Hierzu wurde die webbasierte Applikation Sosci-Survey verwendet (<https://www.socisurvey.de>) und eine Befragung im Zeitraum von Januar bis Februar 2023 durchgeführt, an der 54 Personen (22 Frauen, 32 Männer) teilnahmen [17]. Die Mehrheit der Teilnehmenden (88 %) kam aus dem Großraum Berlin. Im Rahmen der Befragung sollten die Teilnehmenden AVAS-Signale bewerten, die Notwendigkeit von

AVAS zur verbesserten Hörbarkeit einschätzen sowie die Relevanz der AVAS-Auslegung für Kaufentscheidungen einordnen. Für die perzeptive Bewertung auf dem Markt gängiger AVAS-Signale wurden in ruhiger Umgebung Vorbeifahrtgeräusche von fünf Elektrofahrzeugmodellen unterschiedlicher Hersteller für Schrittgeschwindigkeit, Konstantfahrt bei 10 km/h sowie bei 15 km/h mit einem Abstand von 2 m zur Fahrbahn binaural mittels eines SQuadriga I (HEAD acoustics) aufgezeichnet. Obwohl die Mehrheit der Teilnehmenden (94 %) kein Elektrofahrzeug besaß, gaben 54 % an, bereits Fahrerfahrungen mit Elektrofahrzeugen zu besitzen. Ferner konnten über 70% ein oder mehrere Hersteller sowie konkrete Modelle von Elektrofahrzeugen nennen (siehe Bild 1), wobei der Hersteller Tesla am häufigsten genannt wurde, was den Verkaufszahlen in Deutschland neben VW und Renault entspricht [18]. Dabei wurden am häufigsten die Modelle Tesla Model S und Tesla Model 3 sowie Renault Zoe und VW ID.3 genannt.



**Bild 1:** Wortwolke von den am häufigsten in der Umfrage genannten Automobilherstellern von Elektrofahrzeugen

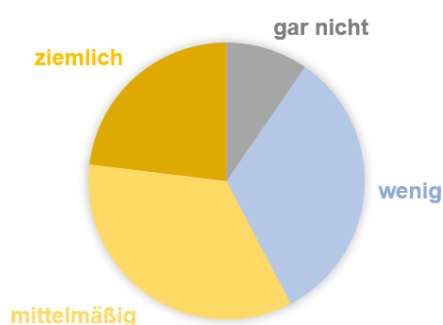
Betrachtet man gesondert Personen, die in der Befragung angaben, eine Sehschwäche zu besitzen, wurde von dieser Personengruppe häufiger AVAS im Straßenverkehr bzw. Alltag wahrgenommen (siehe Bild 2). Ein Unterschied bei der Bewertung der Aussage, ob AVAS-Geräusche bei Elektrofahrzeugen ein Überhören der Fahrzeuge im Verkehr unmöglich machen und Unfälle effektiv vermieden werden, bestand bei der Gruppierung nach Sehschwäche jedoch nicht.



**Bild 2:** Häufigkeit der Wahrnehmung von AVAS im Straßenverkehr (mittels einer 5-stufigen Ratingskala ermittelt) in Abhängigkeit der Angabe zum Vorhandensein einer Sehschwäche

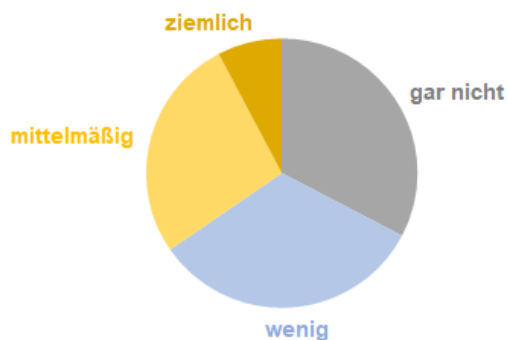
Bild 3 verdeutlicht, dass die Auslegung des AVAS-Signals im Innenraum eines Fahrzeugs für die Mehrheit der Befragten beim Kauf eines Elektrofahrzeugs eine Rolle spielen würde. Dies lässt darauf schließen, dass Lautstärke und Geräuschcharakter des Fußgängerwarnsystems durchaus auch relevant für Kaufinteressenten sind. Bei der Aussage, dass „durch AVAS-Geräusche bei Elektrofahrzeugen ein Überhören der Fahrzeuge im Verkehr unmöglich und Unfälle effektiv vermieden werden“ antwortete nur eine Person mit „trifft nicht zu“. Auf einer 5-stufigen Skala zur Zustimmung der Aussage, die von „trifft nicht zu“ bis „trifft vollkommen zu“ reichte, wurde im Mittel mit dem Wert 3.1 eine deutliche Zustimmung beobachtet. Dabei geht jedoch gleichermaßen die Mehrheit der Befragten davon aus, dass damit auch eine gewisse Erhöhung der Lärmbelastigung bedingt wird (siehe Bild 4).

**INWIEFERN WÜRDEN BEIM ERWERB EINES ELEKTROFAHRZEUGES FÜR SIE AVAS DIE KAUFENTSCHEIDUNG BEEINFLUSSEN?**



**Bild 3:** Verteilung der Antworten auf die Frage, ob AVAS einen Einfluss auf die Kaufentscheidung hätte

**INWIEFERN STIMMEN SIE DER AUSSAGE ZU, DASS AVAS BEI ELEKTROFAHRZEUGEN ZU ERHÖHTER LÄRMBELÄSTIGUNG FÜHRT?**



**Bild 4:** Verteilung der Antworten auf die Frage, ob AVAS allgemein zur Erhöhung der Lärmbelastigung beiträgt

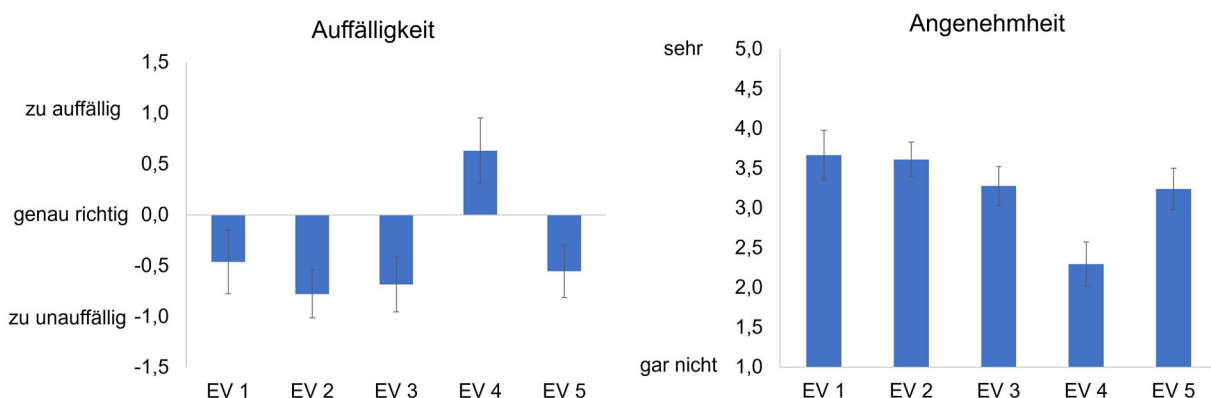
Jedoch berichteten viele Teilnehmende, dass Sie bereits Elektrofahrzeuge in der Vergangenheit im Straßenverkehr überhört hatten und schilderten per freier Texteingabe die Situationen, in denen dieses „Überhören“ auftrat. Bild 5 zeigt häufig genannte Begriffe in den Freitextangaben der Teilnehmenden. Vielfach wurden Elektrofahrzeuge beim Überqueren von Straßen bei langsamer Fahrt überhört. Auch der Ampel- und Parkplatzkontext wurde als Situation, in der ein Elektrofahrzeug häufiger überhört wurde, genannt. Vielfach sei bei den betreffenden Elektrofahrzeugen kein AVAS vorhanden gewesen, was eine Erkennung erschwerte hätte.

Da erst seit Sommer 2021 der Einbau von AVAS verbindlich für Neuzulassungen erforderlich ist, können im Bestand vielfach noch Elektrofahrzeuge ohne AVAS im Straßenverkehr angetroffen werden. Insgesamt nahmen bislang erst 64 % der Befragten AVAS im Straßenverkehr bzw. Alltag bewusst wahr. Bild 6 verdeutlicht die Bewertungen der Kriterien *Auffälligkeit* und der *Angenehmheit* für am Markt befindliche AVAS-Signale von fünf verschiedenen Automobilherstellern, die im Online-Experiment dargeboten und bewertet wurden. Die Lautstärke sollte initial so gewählt werden, dass das Beispielgeräusch der Lautstärke einer typischen Vorbeifahrt entspräche. Die Lautstärke dürfte nach der erfolgten Einstellung laut Instruktion nicht mehr geändert werden.



**Bild 5:** Wortwolke bezüglich der freien Erläuterungen von Situationen, in denen Elektrofahrzeuge überhört wurden

Es zeigte sich dabei ein Zusammenhang zwischen der bewerteten *Auffälligkeit* und der *Angenehmheit*. Die Einzelbewertungen korrelierten dabei hochsignifikant miteinander mit  $r = -0.24$ . D.h. mit höherer *Auffälligkeit* sinkt die bewertete *Angenehmheit*. Jedoch fällt dieser korrelative Zusammenhang insgesamt nur schwach aus.



**Bild 6:** Bewertungen (arithmetisches Mittel und 95% Konfidenzintervall) bezüglich der Auffälligkeit (Just Right Scale) und der Angenehmheit (unipolar) von verschiedenen AVAS-Signalen für Konstantfahrt mit 10 km/h



Interessanterweise bestand zwischen der Bewertung der *Vertrautheit* des jeweiligen AVAS-Signals mit der *Angenehmheit* oder *Auffälligkeit* kein korrelativer Zusammenhang. Beispielsweise wurde die *Vertrautheit* von EV 5 am geringsten eingeschätzt, obwohl das Signal als relativ unauffällig und angenehm eingeschätzt wurde.

Tabelle 4 zeigt für einige ausgewählte akustische Parameter die jeweiligen Ausprägungen für die 5 betrachteten Fahrzeuge mit AVAS für eine Konstantfahrt mit 10 km/h. Deutlich ist zu erkennen, dass EV 4 mit AVAS markant am lautesten war und die größte Tonalität aufwies.

**Tabelle 4:** Ausgewählte akustische Ausprägungen der AVAS-Signale für Konstantfahrt mit 10 km/h

	EV 1	EV 2	EV 3	EV 4	EV 5
Schalldruckpegel $L_{A5}$ in dB(A)	57.3	62.2	60.4	73.8	55.3
Lautheit (ISO 532-1) $N_5$ in sone [19]	10.3	12.5	12.7	21.0	9.8
Tonalität (ECMA 418-2) $T_{ave}$ in tu <sub>HMS</sub> [20]	0.23	0.20	0.18	1.4	0.55

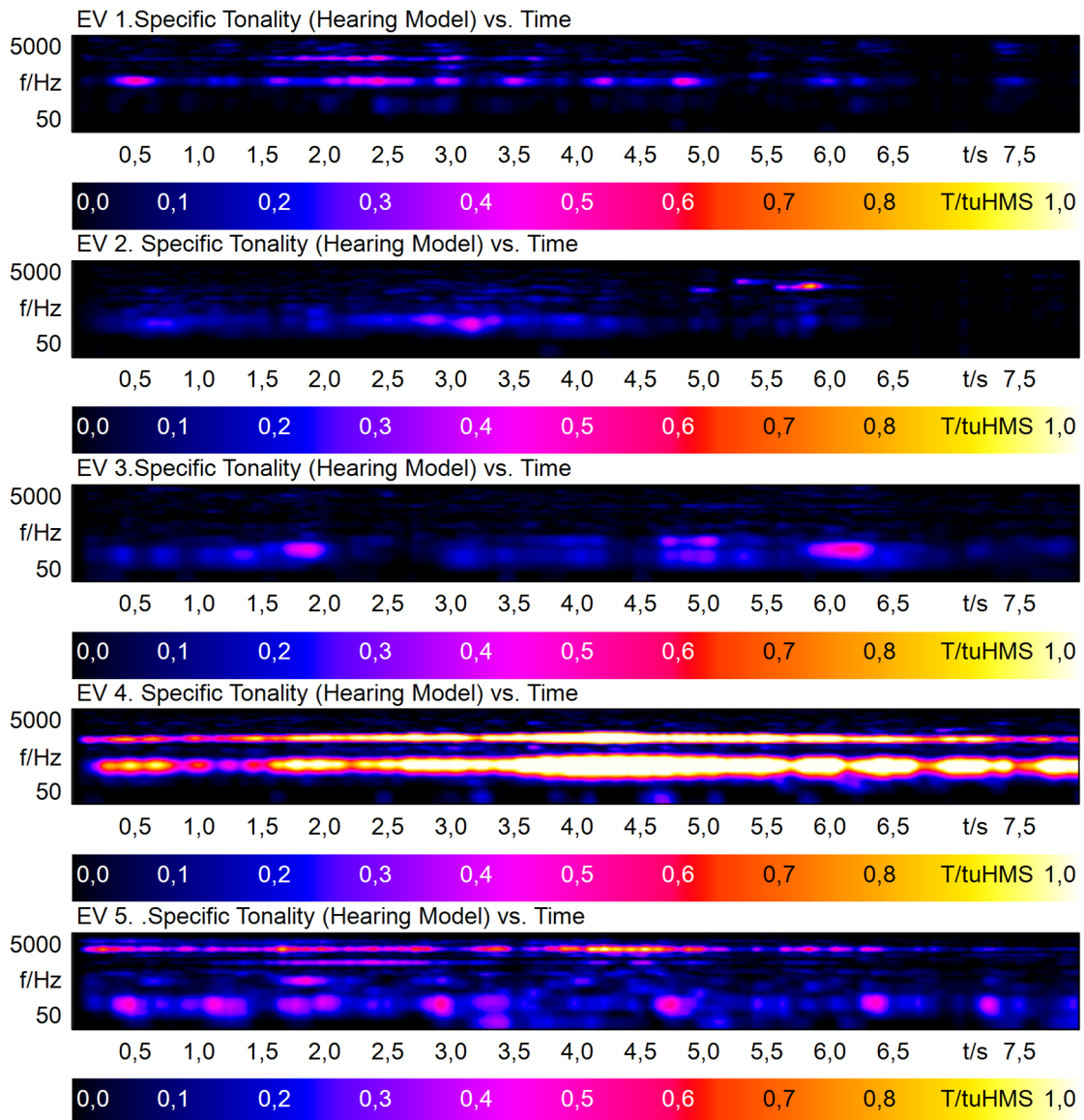
Dies führte bezüglich der Bewertungen der *Angenehmheit* und *Auffälligkeit* zu deutlichen Abwertungen durch die Befragten. Zusätzlich zeigt Bild 7 auf Basis der Tonalitätsanalyse nach ECMA 418-2 [20], dass die Auslegung von AVAS aufgrund der Gestaltungsfreiheiten bezüglich des Frequenzbereiches und des Charakters des AVAS-Signals unterschiedlich bezüglich der Prominenz von tonalen Komponenten ausfällt, die auch noch zusätzlich deutlich in der Frequenz variieren. Grundsätzlich ist es laut gesetzlichen Vorgaben nicht zwingend erforderlich, dass ein oder mehrere prominente Töne vorhanden sein müssen, lediglich für die Berücksichtigung der Anforderung der Frequenzverschiebung ist eine gewisse Ausprägung einer Geräuschkomponente zur Erkennung der Verschiebung bei einer Geschwindigkeitszunahme erforderlich. Auch wird in der UNECE R 138 nicht definiert, welche Signaleigenschaften ein „Ton“, der in seiner Frequenz variiert, um eine Geschwindigkeitsveränderung anzuzeigen, besitzen muss. Hinsichtlich der *Angenehmheit* ist zu erkennen, dass nicht das leiseste (EV 5), sondern das unauffälligste AVAS mit geringer Tonalität (EV 1) gemäß ECMA 418-2 [20] am angenehmsten bewertet wurde.

Da in einem Online-Experiment die Wiedergabelautstärke nicht kontrolliert werden kann und per Instruktion eine Vorbeifahrt auf eine plausible Lautstärke eingestellt werden sollte, können die Versuchsergebnisse nur als bedingt belastbar angesehen werden. Die Probanden wurden angehalten, die Wiedergabelautstärke während der Versuchsteilnahme konstant zu halten, so dass zumindest relative Unterschiede zwischen den AVAS-Signalen erhalten und interpretierbar sind. Es ist jedoch bekannt und vielfach belegt, dass Hörversuche in Form von Online-Experimenten aussagekräftige Ergebnisse erzeugen können [vgl. 21].

#### 4. AVAS – Experiment zur Bewertung des Außengeräusches

Wie in Bild 5 dargestellt, wurde häufiger der Kreuzungsbereich angegeben, bei dem Elektrofahrzeuge überhört würden und daher sollte vor allem in diesem Bereich AVAS eine verbesserte Hörbarkeit der Fahrzeuge ermöglichen. In der RLS 19 [22] wird diese Verkehrssituation aus Sicht der Lärmbewertung gesondert betrachtet. Die erhöhte Störwirkung von lichtzeichengeregelten Kreuzungen und Einmündungen so-

wie von Kreisverkehren wird im Emissionspegel durch die Knotenpunktkorrektur berücksichtigt, die im Wesentlichen durch das Anfahren und Bremsen bzw. durch spezifische psychoakustische Ausprägungen verursacht wird (vgl. [23]). Dabei wird ein Maximalwert der Knotenpunktkorrektur  $K_{KT}$  von 3 dB bei lichtzeichengeregelten Knotenpunkten vergeben und von 2 dB bei Kreisverkehren.



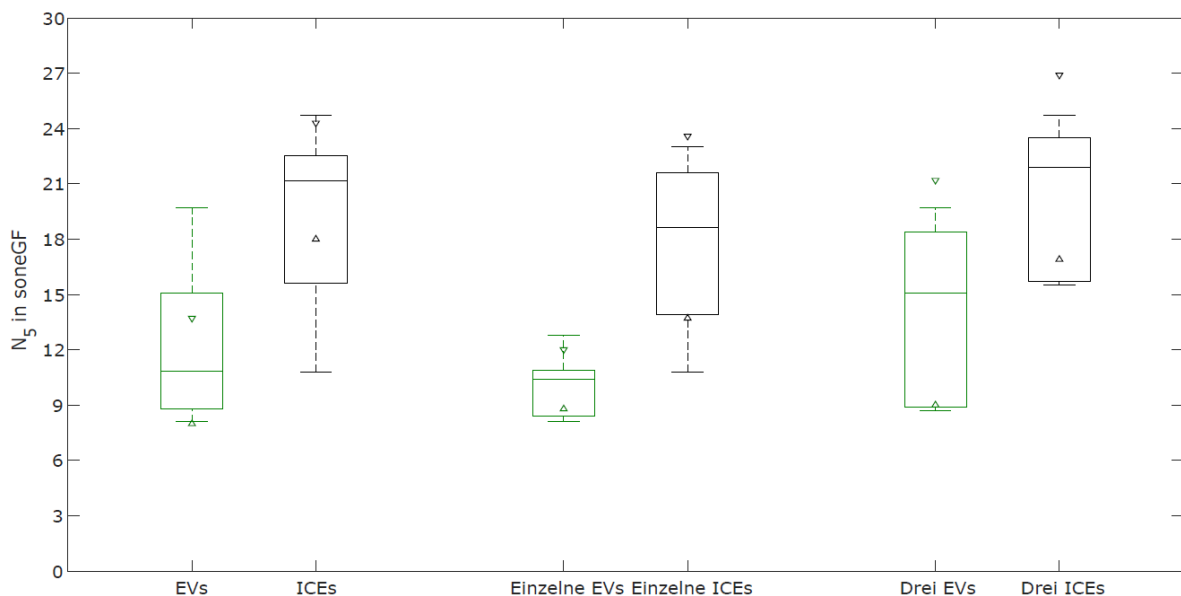
**Bild 7:** Tonalität nach ECMA 418-2 [20] der Vorbeifahrten der Elektrofahrzeuge für die Bedingung Konstantfahrt mit 10 km/h. Von oben nach unten: EV 1 bis EV 5

Jedoch ist bei einer zunehmenden Durchdringung von Elektrofahrzeugen im Fahrzeugbestand unklar, ob nach wie vor aufgrund von Anfahren und Abbremsen eine erhöhte Störwirkung vorliegt, die durch den (berechneten) Mittelungspegel nicht adäquat angezeigt wird. Zwar entfällt bei Beschleunigungsvorgängen bei Elektrofahrzeugen der auffällige Geräuschbeitrag des Verbrennungsmotors, jedoch kommt zusätzlich AVAS zur verbesserten Hörbarkeit von Elektrofahrzeugen akustisch dazu.

Zur Untersuchung der Störwirkung im Kreuzungsbereich wurden verschiedene Verkehrsszenarien für eine Bewertung in einen Hörversuch gemessen [24]. Dabei wurden bis zu drei Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor sowie bis zu drei Elektrofahrzeuge, die

mit AVAS ausgestattet waren, in dem jeweiligen Kreuzungsszenario (Anhalten, Abbiegen, konstante Fahrt) betrachtet. Die Messungen wurden binaural mit einem SQuadriga I (HEAD acoustics) sowie mit einem Schallpegelmesser XL2 (NTI audio) in einem Abstand von 7.50 m zur Straße bzw. zum Kreuzungsschnittpunkt durchgeführt. Die Szenarien wurden für die Darbietung im Hörversuch auf jeweils 30 s geschnitten und mittels eines Kopfhörers (Sennheiser HD 650) dargeboten. Die Wiedergabelautstärke wurde im Vorfeld der Hörversuchsdurchführung mittels eines Kunstkopfmesssystems HMS III (HEAD acoustics) überprüft. Insgesamt wurden den Probanden im Hörversuch 26 Signale präsentiert. Zur Bewertung der Verkehrsgeräusche wurden multiple Ratingskalen verwendet. Die Signale wurden hinsichtlich ihrer Lautheit, Lästigkeit, Tonhaltigkeit, Schärfe und Auffälligkeit auf 11-stufigen unipolaren Skalen, die von 'gar nicht' (1) bis 'extrem' (11) reichten, bewertet. Insgesamt nahmen 31 Personen am Hörversuch teil.

Bild 8 zeigt die Unterschiede in der psychoakustischen Lautheit nach DIN 45631/A1 [25] zwischen den erstellten Verkehrsgeräuschen, die ausschließlich mit Elektrofahrzeugen bzw. Kraftfahrzeugen mit Verbrennungsmotor (ICE) erzeugt wurden. Grundsätzlich ist ein systematischer Unterschied zwischen der resultierenden Lautheit nach Antriebsart festzustellen. Trotz AVAS sind im Mittel die Szenarien mit Elektrofahrzeugen im Vergleich zu den ICE-Szenarien um 30% leiser. Diese Beobachtung ist analog zu der Analyse des Schalldruckpegels (z.B.  $L_{Aeq}$ ), bei dem ein mittlerer Pegelunterschied von 5.4 dB beobachtet wurde.



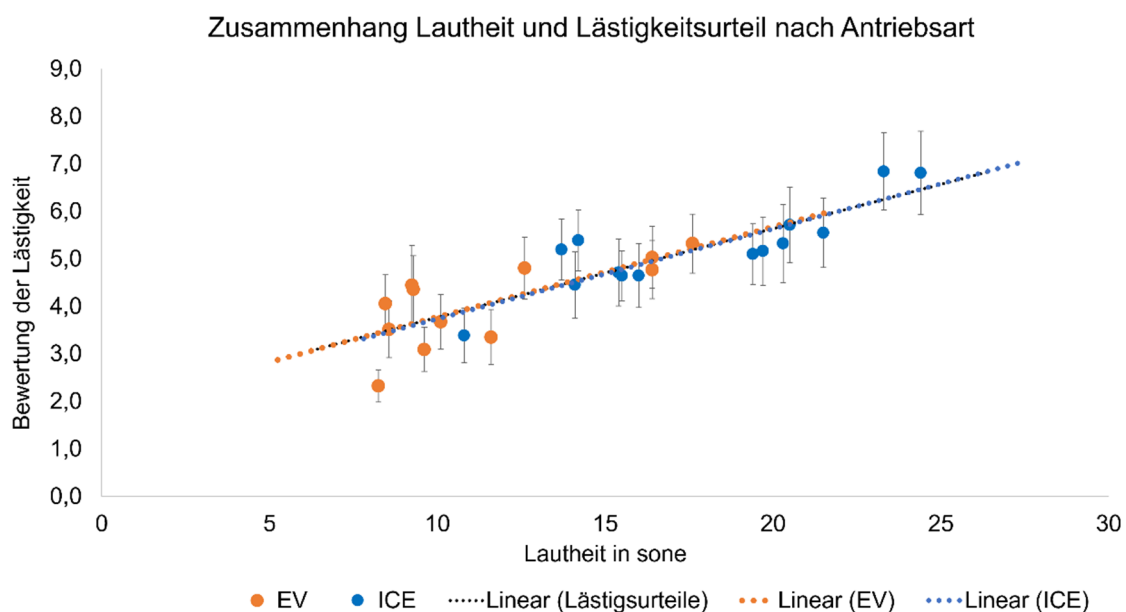
**Bild 8:** Vergleich der ermittelten Lautheitswerte  $N_5$  nach DIN 45631/A1 [25] getrennt nach Elektrofahrzeug- und Verbrennungsmotorszenarien. Links: Alle Signale, Mitte: Nur Szenarien mit einem einzelnen Fahrzeug; rechts: Nur Szenarien mit jeweils 3 Fahrzeugen

**Tabelle 5:** Korrelative Zusammenhänge (Bestimmtheitsmaß  $R^2$ ) zwischen ausgewählten akustischen Größen und Hörversuchsbewertungen der Items 'laut', 'lästig' und 'auffällig'. Statistisch signifikante Korrelationen sind mit einem Sternchen gekennzeichnet.

	laut	lästig	auffällig
Schalldruckpegel $L_{A5}$ in dB(A)	0.86*	0.77*	0.85*
Lautheit (DIN 45631/A1) $N_5$ in sone [26]	0.87*	0.78*	0.83*
Schärfe (DIN 45692) $S_{ave}$ in acum [27]	0.29	0.35	0.37
Tonalität (ECMA 418-2) $T_{ave}$ in tuHMS [20]	0.08	0.06	0.09

Bild 9 verdeutlicht, dass zwar die Szenarien mit Elektrofahrzeugen im Mittel leiser sind, jedoch einen ähnlichen (linearen) Zusammenhang mit den Lästigkeitsurteilen wie die Verkehrsgeräusche mit ICE-Fahrzeugen aufweisen. Wird eine lineare Regressionsgerade für beide Datensätze separat ermittelt, liegen diese nahezu übereinander. D.h., dass offensichtlich auf Basis der Hörversuchsdaten kein Versatz (Bonus oder Malus) in den Urteilen in Abhängigkeit der Antriebsart beobachtet werden kann.

Die Bewertung der Lästigkeit folgt der Lautheit, wodurch Vorbeifahrtgeräusche von Elektrofahrzeugen scheinbar aufgrund von AVAS nicht per se angenehmer sind. Dadurch wird deutlich, dass durch AVAS vermutlich nach wie vor von einem Kreuzungszuschlag im Vergleich zu Konstantfahrten mit höherer Geschwindigkeit ausgegangen werden muss analog zur aktuellen Regelung der RLS 19. Hierbei könnte die Korrektur, der in der RLS 19 bisher angenommenen Größenordnung entsprechen. D.h. Elektrofahrzeuge mit AVAS werden im Bereich von Kreuzungen nicht systematisch angenehmer empfunden bzw. bewertet, wobei natürlich bei der Lärmbewertung der verringerte Mittelungspegel berücksichtigt werden muss.



**Bild 9:** Lästigkeitsurteile (arithmetische Mittelwerte und 95% Konfidenzintervall) über Lautheitswerte nach DIN 45631/A1 [25] in sone der EV und ICE-Szenarien sowie lineare Regressionsgeraden

## 5. Fazit

Das Thema AVAS polarisiert. Seh- und Blindenverbände fordern einen noch stärkeren Schutz der Sehbehinderten durch eine Erweiterung der gesetzlich vorgeschriebenen akustischen Anforderungen an AVAS. Gleichzeitig äußern sich Behörden ob der Erhöhung der Lärmbelastigung kritisch und sehen dies als eine wenig nachhaltige Lösung des Fußgängerschutzes an.

Im Rahmen einer Online-Umfrage wurde beobachtet, dass die Mehrheit der befragten Personen von einer Erhöhung der Sicherheit durch AVAS ausgehen und daher AVAS-Implementierungen nicht per se ablehnen. Zwei Drittel der Befragten haben AVAS im Alltag bereits wahrgenommen, wobei Personen mit Sehschwäche häufiger angaben, diese Geräusche schon bewusst wahrgenommen zu haben. Ferner zeigte sich, dass für viele Befragten durchaus die herstellerbezogene Auslegung von AVAS in die Kaufentscheidung einfließen würde. Die Bewertungen einzelner AVAS-Signale zeigten erwartungsgemäß, dass die lautereren und tonhaltigeren AVAS-Geräusche als weniger angenehm bewertet wurden. Ferner wurde in einem Laborhörversuch die Wirkung von AVAS in Straßenverkehrssituationen im Bereich von Kreuzungen näher untersucht. Auf Basis einer Messkampagne, bei der verschiedene Verkehrsszenarien mit jeweils drei Fahrzeugen (EV vs. ICE) nachgestellt wurden, zeigte sich, dass die Szenarien mit reinen Elektrofahrzeugverkehr im Mittel ca. 5 dB bzw. nach DIN 45631/A1 um ca. 30% leiser ausfielen. Die resultierende Verringerung der Lästigkeit im Hörversuch bei Vergleich zu Szenarien mit Kraftfahrzeugen mit Verbrennungsmotor folgte der Reduktion der Lautheit bzw. des Schalldruckpegels. Eine zusätzliche Verringerung der Lästigkeit durch AVAS-Geräusche über die Veränderung der Lautstärke hinaus konnte nicht beobachtet werden. Dadurch erscheint ebenfalls eine Erhöhung der Störwirkung bei Straßenverkehrsgeräuschen in Kreuzungsnähe im Vergleich zum Verkehr mit konstantem Verkehrsfluss auch bei Elektrofahrzeugen vorzuliegen.

## Literatur

- [1] ZSW. (2022). Anzahl von Elektroautos weltweit von 2012 bis 2021. Statista. Statista GmbH. Zugriff: 22. Mai 2023. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/168350/umfrage/bestandsentwicklung-von-elektrofahrzeugen/>
- [2] KBA. (2023). Anteil der Elektroautos am Bestand der Personenkraftwagen in Deutschland von 2013 bis 2023. Statista. Statista GmbH. Zugriff: 22. Mai 2023. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/784986/umfrage/marktanteil-von-elektrofahrzeugen-in-deutschland/>
- [3] EEA (2020). Environmental noise in Europe — 2020. European Environment Agency. EEA Report No 22/2019, Copenhagen, Denmark
- [4] WHO (2018). Environmental noise guidelines for the European region. World Health Organization, WHO Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark
- [5] Campello-Vicente, H., Peral-Orts, R., Campillo-Davo, N., Velasco-Sanchez, E. (2017). The effect of electric vehicles on urban noise maps. Applied Acoustics, 116, 59-64. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.09.018>
- [6] Fiebig, A., Marla, P., Sottek, R. (2012). Noise of electric and combustion-powered scooters and resulting annoyance. Euronoise 2012, Prag, Czech Republic, European Acoustics Association, 2012

- [7] Pierce, B. (2007). A Report on the Quiet Car Emergency. The Media Weigh in, Braille Monitor, Vol. 50, Nr. 7, 2007
- [8] EBU (2019). Silent cars and AVAS. Questions and answers. European Blind Union
- [9] Hanna, R. (2009). Incidence of Pedestrian and Bicyclist Crashes by Hybrid Electric Passenger Vehicles. Technical Report DOT HS 811-204, National Highway Traffic Safety Administration, US Department of Transportation, Washington, DC
- [10] Sandberg, U., Goubert, L., Mioduszewski, P. (2010). Are vehicles driven in electric mode so quiet that they need acoustic warning signals. Proceedings of ICA 2010, 20th International Congress on Acoustics, Sydney, Australia
- [11] Kim, D. S., Emerson, R. W., Naghshineh, K., Pliskow, J., Myers, K. (2012). Impact of adding artificially generated alert sound to hybrid electric vehicles on their detectability by pedestrians who are blind. Journal of Rehabilitation Research and Development 49(3), 381–393
- [12] Boenke, D., Nass, J., Haas, R., Hubbes, S., Lehming, B. (2021). Lärmtechnische Bewertung des Acoustic Vehicle Alerting System (AVAS), Umweltbundesamt, 122/2021, Dessau-Roßlau
- [13] European Union (2014). Regulation (EU) No 540/2014 of the European Parliament and of the Council of 16 April 2014 on the sound level of motor vehicles and of replacement silencing systems, and amending Directive 2007/46/EC and repealing Directive 70/157/EEC. Official Journal of the European Union, 158
- [14] UNECE (2017). Regulation No. 138 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UNECE) — Uniform provisions concerning the approval of Quiet Road Transport Vehicles with regard to their reduced audibility. Economic Commission for Europe of the United Nations, Revision 1
- [15] FMVSS (2016). Minimum Sound Requirements for Hybrid and Electric Vehicles. Federal Motor Vehicle Safety Standard Nr. 141, Vol. 81, 240, Docket No. NHTSA–2016–0125
- [16] Fiebig, A. (2020). Electric vehicles get alert signals to be heard by pedestrians: Benefits and drawbacks, Acoustics Today, Winter 2020, Vol. 16 (4), 20-28, <https://doi.org/10.1121/AT.2020.16.4.20>
- [17] Yahya, W. (2023). AVAS – Einschätzung der Wirksamkeit und aktuelle Akzeptanz von AVAS-Systemen, Bachelorarbeit, TU Berlin
- [18] KBA. (2022). Anzahl der Personenkraftwagen mit Elektroantrieb in Deutschland nach Marken in den Jahren 2020 bis 2022. Statista. Statista GmbH. Zugriff: 22. Mai 2023. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/694193/umfrage/personenkraftwagen-mit-elektroantrieb-in-deutschland-nach-marken/>
- [19] ISO 532-1 (2017). Acoustics — Methods for calculating loudness — Part 1: Zwicker method. International Organization of Standardization, Genf
- [20] ECMA 418-2 (2020). Psychoacoustic metrics for ITT equipment. Part 2 (Models based on human perception), ECMA International, Genf
- [21] Wycisk, Y., Sander, K., Manca, B., Kopiez, B., Bergner, J., Platz, F., Preihs, S., Peissig, J. (2023). Audio-Experimente im Internet: Kontrolle über die Abhör-situation mittels des Headphone and Loudspeaker Tests (HALT), DAGA 2023, Hamburg

- [22] RLS-19 (2019). Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Nr. 052, ISBN: 978-3-86446-256-6, 2019
- [23] Fiebig, A., Papenfus, T. (2010). Untersuchungen zur akustischen Störwirkung von Kreuzungspunkten im Rahmen der Überarbeitung der RLS-90, DAGA 2010, Tagungsband, Berlin
- [24] Hittmann, C. (2023). Untersuchungen zur Veränderung des Straßenverkehrsgereäusches aufgrund von AVAS, Masterarbeit, TU Berlin
- [25] DIN 45631/A1 (2010). Berechnung des Lautstärkepegels und der Lautheit aus dem Geräuschspektrum – Verfahren nach E. Zwicker – Anhang 1: Berechnung der Lautheit zeitvarianter Geräusche, Deutsches Institut für Normung, Berlin
- [26] DIN 45692 (2009). Messtechnische Simulation der Hörempfindung Schärfe. Deutsche Institut für Normung, Berlin