

Elektromobilität: Angepasste Geschwindigkeits-Pegel-Skalierung erhöht die Sicherheit

Lisa Steinbach, M. Ercan Altinsoy, Robert Rosenkranz

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

Email: lisa.steinbach@tu-dresden.de

Einleitung

Im heutigen städtischen Umfeld sind die Bewohner dauerhaft erhöhten Lärmpegeln ausgesetzt, die meist von Verkehrslärm dominiert werden. Der Prozess der Elektrifizierung von Fahrzeugen könnte den Verkehrslärm in den Stadtzentren verändern. Ziel dieser Arbeit ist, die Detektionsfähigkeit von sicherheitskritischen Verkehrssituationen zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurden vor allem Blinde und Sehbeeinträchtigte befragt, was aus ihrer Sicht eine sicherheitskritische Situation darstellt. Dafür wurden neun verschiedene synthetische Außengeräusche für Elektrofahrzeuge erzeugt. Die Unterschiede in der Detektionsfähigkeit wurden mithilfe einer Wahrnehmungsstudie untersucht. Darüber hinaus wurden für alle neun Außengeräusche Varianten mit unterschiedlichen Geschwindigkeits-Pegel-Skalierungen erzeugt: Geschwindigkeits-Pegelskalierung bis 0 km/h, Skalierungen bei denen der Schallpegel unter 5 oder unter 10 km/h unabhängig von der Fahrzeuggeschwindigkeit nicht reduziert wird, sondern konstant gehalten wurde.

Stimuli

Sowohl für den Vorversuch als auch für den Hauptversuch dieser Studie wurden Grundgeräusche generiert, welche den derzeitigen Anforderungen (vgl. [5]) entsprechen. Dafür wurden aufbauend auf einer Grundvariante acht weitere Geräusche erzeugt (vgl. Abb.1). Die Grundvariante besteht aus drei tonalen Motorordnungen, wie es bei einem herkömmlichen Verbrennungsmotor üblich ist. Diese Motorordnungen liegen bei 240, 270 und 300 Hz bei 0 km/h und steigen mit 3 % pro 1 km/h an (vgl. Abb. 1, Bild 1). Bei weniger als drei Motorordnungen zeigte sich in einem Vorversuch, dass das Geräusch nicht mehr klar als ein Fahrzeug identifizierbar war. Da höhere Motorordnungen meist einen geringeren Pegel haben als Niedrigere, wurde die mittlere Motorordnung um 6 dB und die höchste Motorordnung um 12 dB im Pegel verringert. Um den, vor allem bei Abwesenheit von Hintergrundgeräuschen vorhandenen, starken tonalen Charakter zu reduzieren, wurde dem Zusatzgeräusch ein Schmalbandrauschen hinzugefügt, dessen spektrales Maximum 24 dB unter dem Maximum der tonalen Komponente mit dem höchsten Pegel lag. Aus diesen anfänglichen Designentscheidungen resultierte ein Basiszusatzgeräusch mit Fahrzeugcharakter. In einem Vorversuch wurde der Pegel dieses Zusatzgeräuschs so eingestellt, dass er bei 10 km/h in mehr als 5 m (Anhalteweg bei 0 km/h) Entfernung des Fahrzeugs bei dem Hintergrundgeräusch mit 55 dB(A) detek-

tiert ist. Im Folgenden wurden ausgehend von diesem Basisgeräusch einige Parameter variiert. Erstens wurde der Pegel des Hintergrundrauschens um 6 dB verstärkt (vgl. Abb. 1, Bild 2) bzw. reduziert (vgl. Abb. 1, Bild 3). Zweitens wurde der Pegel der drei Ordnungen auf denselben Pegel gesetzt (vgl. Abb. 1, Bild 4). Drittens wurde der Ordnungsabstand auf das Doppelte (vgl. Abb. 1, Bild 5) bzw. Dreifache (vgl. Abb. 1, Bild 6) der Grundfrequenz ($f_{\text{base}} = 30 \text{ Hz}$) erhöht, um das Zusatzgeräusch auf einen breiteren Spektralbereich zu erweitern und so möglicherweise die Detektierbarkeit zu erhöhen. Schließlich wurden die Ordnungen um das Ein- bis Dreifache der Grundfrequenz zu höheren Frequenzen hin verschoben, da die hochfrequenten Geräusche möglicherweise eine erhöhte Warnwirkung aufweisen könnten (vgl. Abb. 1, Bild 7-9). Um die Detektionsfähigkeit der künstlich erzeugten Außengeräusche zu untersuchen, ist es wichtig die Versuche mit Anwesenheit eines Hintergrundgeräusches durchzuführen. Dafür wurde ein realistisches Hintergrundgeräusch ohne Dominanz von Einzelereignissen mit einem mittleren Schalldruckpegel von 55 dB(A) gewählt (vgl. [1], [2] und [3]). In Abbildung 2 ist exemplarisch das Frequenzspektrum über der Zeit für die ausgewählte Hintergrundszene dargestellt.

Versuchsdurchführung

Ziel der Experimente (Vor- und Hauptversuch) ist die Messung der Reaktionszeit, die eine Versuchsperson benötigt, um auf ein sich näherndes Fahrzeug in Anwesenheit eines Hintergrundgeräuschs zu reagieren. Für die Versuche wurden Szenen erstellt, welche jeweils ein Hintergrundgeräusch als auch Geräusche eines sich nähernden Fahrzeuges beinhalten. Dabei beantworteten die Probanden die Frage „Wann bemerken Sie das sich nähernde Fahrzeug?“ und betätigten unmittelbar nach dem Wahrnehmen des Fahrzeuges einen Knopf. Hierbei ist wesentlich, in welcher Entfernung die Fahrzeuge auditiv wahrnehmbar sind. Diese Entfernung sollte den Mindestabstand zwischen Fahrzeug und einem Fußgänger (kritischer Abstand) einhalten bzw. unterschreiten, so dass die Erkennbarkeit früh genug gegeben ist, um einen Unfall zu vermeiden. Der kritische Abstand kann für eine Konstantfahrt mit folgender Gleichung (1) berechnet werden:

$$s_{\text{Anhalte}} = s_{\text{Reaktion}} + s_{\text{Brems}} \quad (1)$$
$$s_{\text{Anhalte}} = v_{\text{Fzg}} \cdot t_{\text{Reaktion}} + \frac{v_{\text{Fzg}}^2}{2 \cdot a_{\text{Brems}}}$$

Der Anhalteweg ist die Summe aus Reaktionsweg (s_{Reaktion}) und Bremsweg (s_{Brems}). Der Reaktionsweg

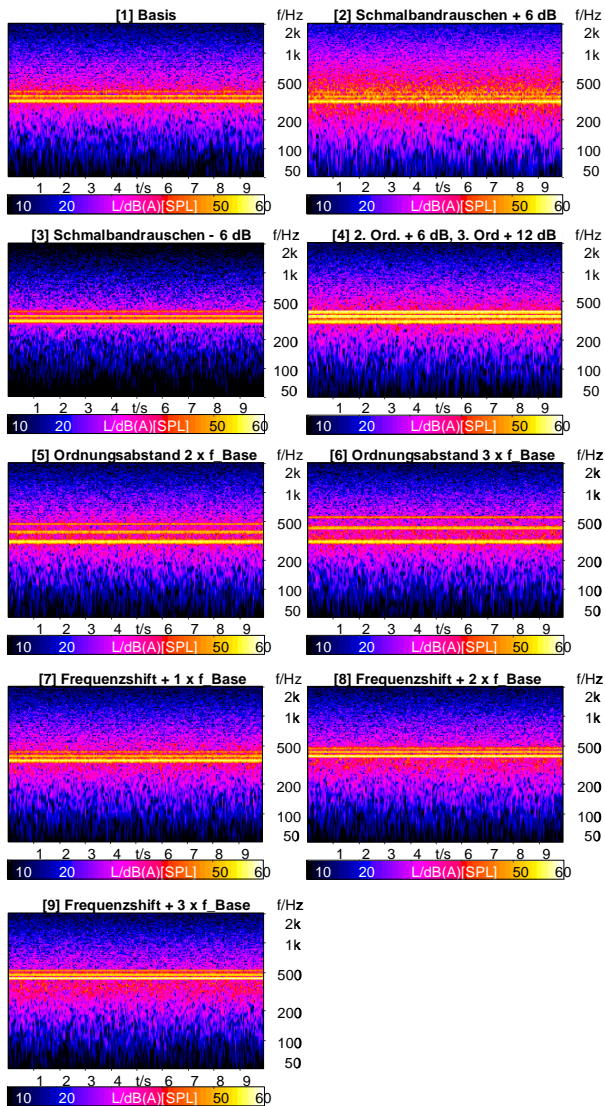


Abbildung 1: Übersicht der neun künstlich erzeugten Geräuschvarianten für Elektrofahrzeuge

berechnet sich aus Fahrzeuggeschwindigkeit (v_{Fzg}) sowie Reaktionszeit des Fahrers ($t_{Reaktion}$). Wird die typische Reaktionszeit für unkonzentrierte Verkehrsteilnehmer ($t_{Reaktion}=1,5s$) nach Green [4] und eine Bremsverzögerung ($a_{Brems} = 8m/s^2$) angenommen, ergibt sich bei einer konstanten Fahrgeschwindigkeit von 10 km/h ein kritischer Abstand von 4,17m. In dieser Studie wurden Erkennungszeiten herannahender Fahrzeuge bei einer Konstantfahrt mit 10 km/h und anfahrender Fahrzeuge mit einer konstanten Beschleunigung von $0,6 m/s^2$ in einem realistischen Hintergrundgeräusch von 55 dB(A) gemessen. Um zu verhindern, dass sich die Probanden auf den Startpunkt der Fahrzeuggeräusche einstellen können und um den Einfluss der geringfügigen Pegelunterschiede im Hintergrund auszuschließen wurden diese mit randomisierten Verzögerungszeiten zwischen 1s und 3s gestartet. Die Wiedergabereihenfolge der Szenen wurden ebenfalls randomisiert im Hörversuchslabor über einen Kopfhörer der Fa. Sennheiser vom Typ HD 600 kalibriert dargeboten. Im Versuchs-Setup wurden alle de-

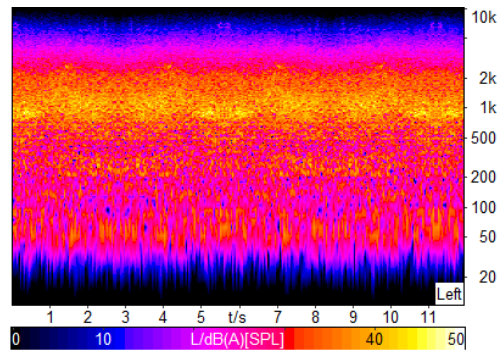


Abbildung 2: Hintergrund-Stimulus 55 dB(A), FFT über der Zeit

terminierten Verzögerungen bestimmt und kompensiert. Die Summe der nicht korrigierbaren hardwarebedingten Verzögerungszeiten wurde mit $< 10ms$ bestimmt. Dieser Betrag stellt den Fehler der Reaktionszeitmessung dar – ist aber vernachlässigbar klein. Die Benutzeroberfläche wurde mit Matlab-GUI implementiert. Dem eigentlichen Hörversuch wurde ein Training vorge stellt, in welchem verschiedene Szenen dargeboten wurden. Die Probanden konnten sich mittels der Trainingsstimuli gut „einhören“ und erhielten zusätzlich vom Versuchsleiter Erläuterungen zur gehörten Verkehrsszene. An dem Vorversuch nahmen insgesamt 23 normalhörende Personen (12 männlich, 11 weiblich) im Alter von 21 bis 70 Jahren teil. Das Durchschnittsalter der Probanden betrug 33,8 Jahre. An dem Hauptversuch nahmen 18 Probanden (9 männliche Probanden, 9 weibliche Probanden) mit einem Durchschnittsalter von 34,3 Jahren teil (25–62 Jahre).

Vorversuch: Detektionsfähigkeit eines herannahenden Fahrzeugs mit einer konstanten Geschwindigkeit von 10 km/h

Um sicher zu stellen, dass die synthetischen Elektrofahrzeuggeräusche rechtzeitig detektierbar sind, wurden Probandenversuche bezüglich der Reaktion auf Vorbeifahrtgeräusche mit einer konstanten Geschwindigkeit von 10 km/h durchgeführt. Diese Verkehrssituation zu untersuchen scheint sinnvoll, da im aktuellen Entwurf der UN ECE eine Minimalpegelanforderung für Konstantfahrten bei 10 km/h gegeben ist. Abbildung 3 zeigt die experimentell ermittelten Detektionszeiten des Vorversuches als Mittelwerte und die Standardabweichung über alle Versuchspersonen. Dabei zeigt die x-Achse die untersuchten Sounds und die y-Achse die Erkennungszeiten in Sekunden. Die rote waagerechte Linie markiert den kritischen Abstand bzw. die kritische Detektionszeit für unkonzentrierte Verkehrsteilnehmer für eine Geschwindigkeit von 10 km/h. Würden die Geräusche oberhalb der Linie liegen, wären sie erst in einem zu geringeren Abstand hörbar, sodass ein Unfall hier schwer zu verhindern wäre. Allgemein zeigt sich, dass alle neun Elektrofahrzeuggeräusche, die auf Basis des Richtlinienentwurfs generiert wurden, rechtzeitig hörbar sind.

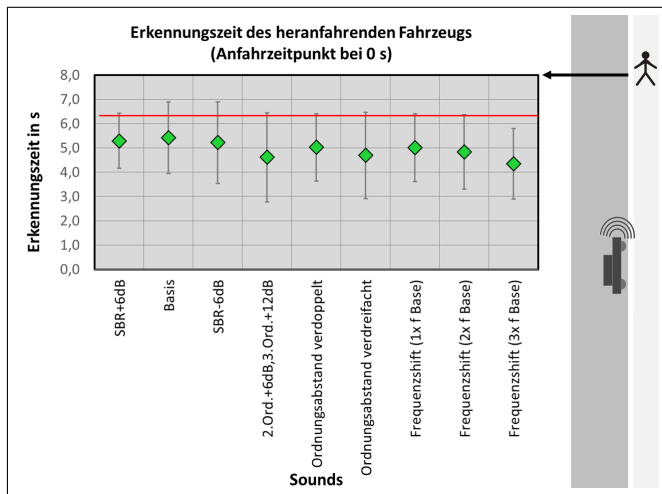


Abbildung 3: Ergebnisse der experimentell ermittelten Detektionszeiten (Erkennungszeiten) in Sekunden für die Annäherung von Fahrzeugen mit einer konstanten Geschwindigkeit von 10 km/h als Mittelwerte und Standardabweichungen über alle Versuchspersonen. Darüber hinaus ist der kritische Abstände für unkonzentrierte Verkehrsteilnehmer (rote Linie) gezeigt.

Hauptversuch: Detektionsfähigkeit eines anfahrenden Fahrzeugs mit einer konstanten Beschleunigung von $0,6 \text{ m/s}^2$

Um eine besonders sicherheitskritische Situation für Blinde und Sehbeeinträchtigte zu untersuchen, wurde ein freies Interview bezüglich der Präzisierung einer solchen Situation geführt. Dazu wurden insgesamt 15 Blinde und Sehbeeinträchtigte befragt, welche Situationen für sie im Alltag besonders sicherheitskritisch sind (vgl. Abbildung 4). Aufgrund dieser Äußerungen wurde eine Situation ex-

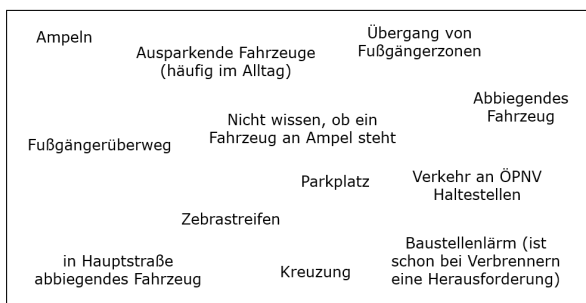


Abbildung 4: Überblick über sicherheitskritischen Situationen aus Sicht der Blinden/Sehbeeinträchtigten

emplarisch ausgewählt: das Anfahren aus einem Parkplatz. In dieser Situation beschleunigt das Fahrzeug von 0 bis 10 km/h mit einer konstanten Beschleunigung von $0,6 \text{ m/s}^2$. Der Passant befindet sich in einem geringen Abstand ($6,5 \text{ m}$) von dem Fahrzeug, sodass das Fahrzeug den Passanten nach rund $4,5 \text{ s}$ mit einer Geschwindigkeit von 10 km/h erreicht. Damit das synthetisch generierte Fahrzeuggeräusch aus dem Hintergrundgeräusch detektierbar ist, muss der Soundgenerator einen gewissen Mindestpegel abstrahlen. Dieser Pegel ist abhängig von der Entfernung des Fahrzeugs zum Passanten, der auf

das Fahrzeug hingewiesen werden soll. Da mit steigender Geschwindigkeit der Anhalteweg des Fahrzeugs ansteigt, vergrößert sich mit der Fahrzeuggeschwindigkeit auch die Entfernung, in der ein Passant das Fahrzeug erkennen muss. Dieser Zusammenhang wird in [6] näher erklärt. Der Anhalteweg (s_{Anhalte}) berechnet sich über Formel 1. Für eine konstante Geschwindigkeit konnten im Vorversuch Pegel ermittelt werden, damit die Fahrzeuge rechtzeitig detektiert werden können (vgl. Abb. 3). Aufgrund dieser detektierbaren Pegel und der Formel des Anhaltewegs kann der Pegelverlauf eines anfahrenden Fahrzeugs ermittelt werden. Da der Anhalteweg bei niedrigen Geschwindigkeiten fast allein durch den Reaktionsweg bestimmt wird, sollte der Passant bis spätestens ca. 3 s bevor das Fahrzeug ihn erreicht reagiert haben, damit das Fahrzeug noch rechtzeitig zum Stillstand kommen kann. Da der Pegel beim anfahrenden Fahrzeug zum notwendigen Detektionszeitpunkt fast 10 dB unterhalb des Pegels eines herannahenden Fahrzeugs mit einer konstanten Geschwindigkeit von 10 km/h liegt (vgl. Abb. 5, roter Kreis), wurden zwei weitere Geschwindigkeits-Pegel-Skalierungen erzeugt. Dabei wird der Pegel von 0 bis 5 km/h konstant bei dem von 5 km/h gehalten (siehe Abb. 5, blaue Linie) und von 0 bis 10 km/h konstant auf dem Pegel von 10 km/h gehalten (siehe Abb. 5, gelbe Linie). Die Ergebnisse für die Detektionsversuche bei unter-

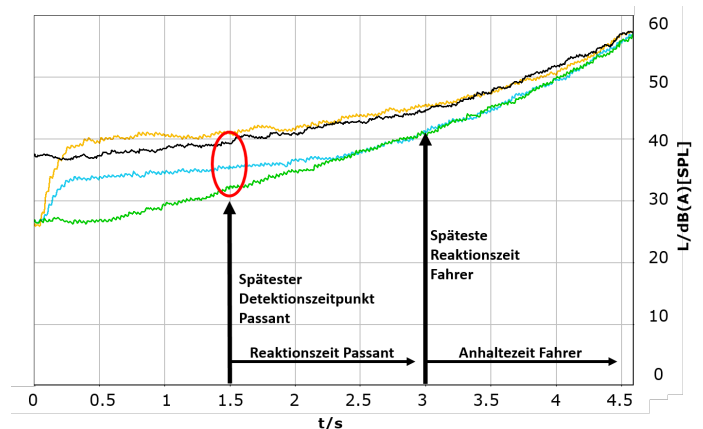


Abbildung 5: Pegelverlauf des anfahrenden Fahrzeugs im Vergleich zum herannahenden Fahrzeug an der Position des Probanden (schwarz: herannahendes Fahrzeug mit konstanter Geschwindigkeit von 10 km/h; grün: anfahrendes Fahrzeug mit Geschwindigkeits-Pegel-Skalierung ab 0 km/h; blau: anfahrendes Fahrzeug mit Geschwindigkeits-Pegel-Skalierung ab 5 km/h; gelb: anfahrendes Fahrzeug mit Geschwindigkeits-Pegel-Skalierung ab 10 km/h)

schiedlichen Geschwindigkeits-Pegel-Skalierungen sind in Abbildung 6 dargestellt. Die Erkennungszeiten für ein anfahrendes Fahrzeug mit einer Geschwindigkeits-Pegel-Skalierung von 0 bis 10 km/h (vgl. Abb. 6, grüne Diamanten) bestätigen die Vermutung, dass eine vollständige Pegel-Geschwindigkeitsskalierung (ab 0 km/h) für eine rechtzeitige Erkennung vollkommen unzureichend ist. Eine Geschwindigkeits-Pegel-Skalierung ab 5 km/h (vgl. Abb. 6, blaue Quadrate) zeigt mittlere Erkennungszeiten nahe der kritischen Detektionszeit. Für die Sounds 2.Ord.+6dB, 3.Ord.+12dB und Frequenzshift ($3x f_{\text{base}}$)

liegen die Mittelwerte sogar vor der kritischen Detektionszeit. Da aber die Standardabweichungen deutlich im „unsicheren“ Bereich liegen, ist auch diese Geschwindigkeit-Pegel-Skalierung nicht ausreichend, um eine sichere Detektierbarkeit eines anfahrens Fahrzeugs bei niedrigen Geschwindigkeiten zu gewährleisten. Die gelben Dreiecke zeigen die Ergebnisse für eine Geschwindigkeits-Pegel-Skalierung ab 10 km/h. Das bedeutet, dass der Pegel für die Geschwindigkeiten von 0 bis 10 km/h konstant bei dem Pegel von 10 km/h Konstantfahrt (vgl. Vorversuch) ist. Für alle neun Sounds liegen die Mittelwerte unterhalb der kritischen Detektionszeit. Auch die Standardabweichungen liegen für fast alle Sounds komplett unterhalb der kritischen Detektionszeit. Für die Sounds „Basis“ und „Basis SBR -6dB“ liegen die Standardabweichungen in der kritischen Detektionszeit. Durch die Anhebung der Pegel für den nied-

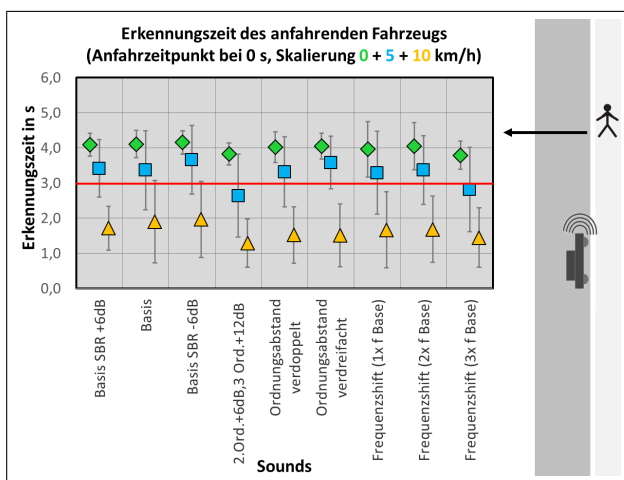


Abbildung 6: Ergebnisse der experimentell ermittelten Detektionszeiten in Sekunden für die Annäherung von Fahrzeugen mit einer konstanten Beschleunigung von $0,6 \text{ m/s}^2$ als Mittelwerte und Standardabweichungen über alle Versuchspersonen. (grüne Diamanten: Geschwindigkeits-Pegel-Skalierung ab 0 km/h; blaue Quadrate: Geschwindigkeits-Pegel-Skalierung ab 5 km/h; gelbe Dreiecke: Geschwindigkeits-Pegel-Skalierung ab 10 km/h; rote Linie: kritische Abstände für unkonzentrierte Verkehrsteilnehmer)

rigen Geschwindigkeitsbereich könnte die Lästigkeit der Sounds gesteigert werden. Abbildung 7 zeigt die Mittelwerte und die Standardabweichungen der ermittelten Lästigkeiten für anfahrens Fahrzeuge mit unterschiedlichen Geschwindigkeits-Pegel-Skalierungen. Die Ergebnisse zeigen, dass die drei Varianten keine signifikanten Unterschiede in der Lästigkeit hervorrufen.

Zusammenfassung

Für die Erzeugung und Verwendung von künstlichen Außengeräuschen für Elektrofahrzeuge spielt die Kenntnis über die Detektionsfähigkeit eine große Rolle. Aus den vorliegenden Ergebnissen zeigt sich, dass eine rechtzeitige Detektion für Sounds auf Basis der bisherigen Regulierungen (UN ECE) für Konstantfahrten mit 10 km/h gegeben ist. Geräusche anfahrens Fahrzeu-

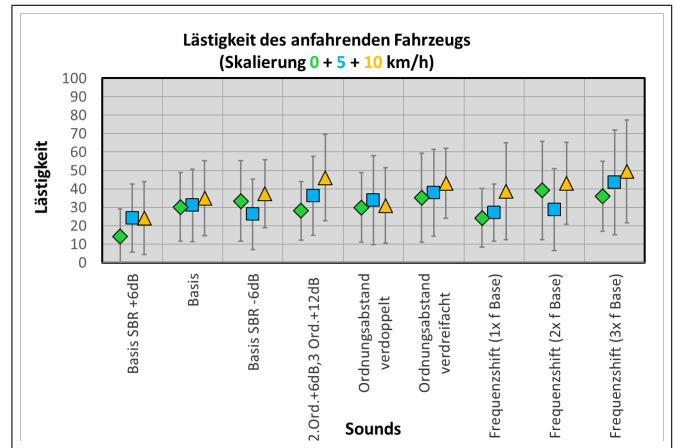


Abbildung 7: Ergebnisse der Lästigkeit für die Annäherung von Fahrzeugen mit einer konstanten Beschleunigung von $0,6 \text{ m/s}^2$ als Mittelwerte und Standardabweichungen über alle Versuchspersonen: grüne Diamanten: Geschwindigkeits-Pegel-Skalierung ab 0 km/h; blaue Quadrate: Geschwindigkeits-Pegel-Skalierung ab 5 km/h; gelbe Dreiecke: Geschwindigkeits-Pegel-Skalierung ab 10 km/h

ge (0 bis 10 km/h) zeigen zu späte Reaktionszeiten. Bleibt der Pegel eines anfahrens Fahrzeugs für 0 bis 10 km/h konstant, ist eine rechtzeitige Detektion möglich. Die verschiedenen Geschwindigkeits-Pegel-Skalierungen bzw. das Konstanthalten der Pegel im niedrigen Geschwindigkeitsbereich führt nicht zu einer Erhöhung der Lästigkeitsempfindung.

Literatur

- [1] Altinsoy, M.E. und Landgraf, J.: „Wahrnehmbarkeit von Fahrzeugaußengeräuschen,“ ATZ Automobiltechnische Zeitschrift, Nr. 09, 2014.
- [2] Altinsoy, M.E.; Landgraf, J.; Rosenkranz, R.; Lachmann, M.; Hagen, K.; Schulze, C. und Schlag, B.: „Wahrnehmung und Bewertung von Fahrzeugaußengeräuschen durch Fußgänger in verschiedenen Verkehrssituationen und unterschiedlichen Betriebszuständen,“ BAST-Projekt-Nr. 82.0578/2012.
- [3] Steinbach, L.; Altinsoy, M.E.: Lästigkeitsbewertung von Verkehrssituationen im Hinblick auf unterschiedliche Antriebskonzepte. In: DAGA 2016 - 42nd German Annual Conference on Acoustics (2016)
- [4] Green, M.: „How long does it take to stop?“ Methodological analysis of driver perception-brake times. Transportation human factors, 2:195-216, 2000.
- [5] QRTV, „Draft Recommendations for a Global Technical Regulation Regarding Audible Vehicle Alerting Systems for Quiet Road Transport Vehicles,“ Informal document GRB-55-14, Presented at 55th GRB (UNECE’s Working Party on Noise), 2012
- [6] Kerber, Stefan, et al.: Wahrnehmbarkeit von Fahrzeugaußengeräuschen in Hintergrundgeräuschen: psychoakustische Beurteilungen und modellbasierte Prognosen. Verlag Dr. Hut, München, 2008