

Psychoakustische Untersuchungen verschiedener Rumpelstreifenausführungen

Thomas Maly¹, Christian Kaseß², Wolfgang Kluger-Eigl³, Holger Waubke⁴

¹ Technische Universität Wien, Institut für Verkehrswissenschaften, Karlsplatz 13/230-2, A-1040 Wien, E-Mail: thomas.maly@tuwien.ac.at

² Österreichische Akademie der Wissenschaften, Institut für Schallforschung, Wohllebengasse 12-14, A-1040 Wien, E-Mail: christian.kasess@oeaw.ac.at

³ Technische Universität Wien, Institut für Verkehrswissenschaften, Karlsplatz 13/230-2, A-1040 Wien, E-Mail: wolfgang.kluger-eigl@tuwien.ac.at

⁴ Österreichische Akademie der Wissenschaften, Institut für Schallforschung, Wohllebengasse 12-14, A-1040 Wien, E-Mail: holger.waubke@oeaw.ac.at

Einleitung

Zur Erhöhung der Sicherheit auf Straßen werden hauptsächlich auf Autobahnen, vor Tunnelportalen und in unfallgefährdeten Bereichen Rumpelstreifen entlang der Fahrbahn angebracht, um beim Abkommen vom Fahrstreifen die Aufmerksamkeit von Fahrzeuglenkern zu erhöhen oder sie im Falle von Sekundenschlaf wachzurütteln [1]. Dabei wird neben Vibrationen zurzeit vorrangig auf einen akustischen Warnton gesetzt. Zu diesem Zweck werden Fräsungen im Asphalt oder Beton mit periodischem Muster durchgeführt. Für solche Muster gilt im Allgemeinen, dass kürzere Abstände und eine tiefere Fräsung eine bessere Wirkung im Sinne eines größeren Pegelausschlags erzielen [2][3]. Der akustische Warnton wird jedoch häufig als penetranter Lärm in der Umgebung wahrgenommen, da einerseits eine beträchtliche Erhöhung des Schalldruckpegels erfolgen kann [4] und andererseits das tonale Geräusch selbst als unangenehm empfunden wird.

Rumpelstreifen werden zwar abseits der regulären Fahrstreifen installiert, sodass eine Befahrung nur sehr selten auftreten sollte. In der Praxis scheint die Zahl der Befahrungen deutlich höher zu liegen: beispielsweise berichtet Perillo [5], dass Fahrer von Lastkraftwagen Rumpelstreifen als akustische Orientierungshilfe bei schlechter Sicht verwenden. Daher sind bei der Installation solcher Rumpelstreifen in der Nähe von bewohnten Gebieten der Sicherheitsaspekt und das Erfordernis Lärmschutz zwei Gegenspieler. Aus diesem Grunde wurde 2015 ein vom Österreichischen Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT) und von der Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs AG (ASFINAG) finanziertes Forschungsprojekt ins Leben gerufen, welches die Möglichkeiten untersuchen sollte, den Lärm in der Umgebung abzuschwächen ohne dabei den Warneffekt für den Lenker signifikant zu beeinflussen.

Variation der Rumpelstreifengeometrien

Das vorliegende Forschungsprojekt widmete sich der Fragestellung von lärmarmen Rumpelstreifen, indem folgende drei Ansätze näher untersucht wurden:

- Reduzierung der Schallabstrahlung, indem der Schall unter das Fahrzeug gelenkt wird.
- Angenehmere Schallcharakteristik, indem das tonale Geräusch durch ein rauschartiges Geräusch ersetzt wird.

- Verminderung der Entstehung höherfrequenter Schallanteile durch sinusförmige Rumpelstreifen.

Für die drei Konzepte wurden zunächst 9 verschiedene Testmuster in einem geeigneten Straßenabschnitt an der S3 nahe Stockerau, in welchem ein Pannestreifen sowie freie Schallausbreitung weitestgehend vorhanden waren, erstellt. Abbildung 1 (oben) gibt einen Überblick über die Rumpelstreifengeometrien des 1. Testfeldes. Auf Basis von gewonnenen Erkenntnisse aus eingehenden Untersuchungen dieser Rumpelstreifen wurden - um Ergebnisse besser interpretieren und absichern zu können - weitere 7 Testmuster im gleichen Straßenabschnitt hergestellt (Testfeld 2, siehe Abbildung 1, unten).

Kurzbezeichnung	RS0a	RS0b	RS1	RS2	RS3	RS4	RS5	RS6	RS7
Beschreibung	konventionell (häufig verwendeter Abstand)	konventionell, schärfere Kante als RS0a	konventionell mit doppeltem Fugenabstand	nach links geneigte Frästromeile	nach rechts geneigte Frästromeile	konventionell mit Zufallsabständen	Sinus mit gewölbter Frästromeile	Sinus ausschließlich im Längsprofil	Sinus mit gewölbter Frästromeile
Fugenform									
Fräsmuster									
Grundrisz Einzelfuge	rechteckig	rechteckig	rechteckig	trapezförmig	trapezförmig	rechteckig	wellenförmig	-	wellenförmig
Frästromeile	zylindrisch	zylindrisch	zylindrisch	zylindrisch	zylindrisch	zylindrisch	gewölbt	gewölbt	gewölbt
Breite B / mm	300	300	300	300	300	300	150 - 300	300	100 - 300
Länge L / mm	150	140	200	200 - 80	80 - 200	140	durchgehend	durchgehend	durchgehend
Fugenabstand A / mm	300	300	600	300	300	300 (Mittel)	600	600	300
Tiefe T / mm	7	10	10	12 - 5	5 - 12	10	9 - 16	0 - 7	6 - 16

Kurzbezeichnung	RS8	RS9	RS10	RS11	RS12	RS13	RS14
Beschreibung	Sinus, breiter und flacher als RS6	Sinus, breiter als RS6	Sinus, breiter und tiefer als RS6	Sinus, breiter, tiefer und halber Fugenabstand gegenüber RS6	konventionell mit doppeltem Fugenabstand, breiter und flacher als RS12	konventionell, breiter und höherer Fugenabstand gegenüber RS0a	konventionell mit Zufallsabständen, breiter, flacher und doppelter Abstand als bei RS4
Fugenform							
Fräsmuster							
Grundrisz Einzelfuge	-	-	-	-	rechteckig	rechteckig	rechteckig
Frästromeile	zylindrisch	zylindrisch	zylindrisch	zylindrisch	zylindrisch	zylindrisch	zylindrisch
Breite B / mm	350	350	350	350	350	350	350
Länge L / mm	durchgehend	durchgehend	durchgehend	durchgehend	200	150	120
Fugenabstand A / mm	600	600	600	300	600	400	600 (Mittel)
Tiefe T / mm	0 - 2 (4)	0 - 5 (7)	0 - 7 (10)	0 - 7 (10)	7	7	7

Abbildung 1: Überblick über die jeweils über eine Länge von 50 m gefrästen Rumpelstreifen des 1. Testfeldes (oben) und des 2. Testfeldes (unten).

Messungen

Es wurden einerseits Schallemissionen- und -immissionen von Überfahrten der Rumpelstreifen mit einem PKW (BMW 320d) und einem LKW (MAN 84S), wie auch

Schallemissionen von Überfahrten von eigens gefrästen Einzelfugen messtechnisch erfasst. Im Fahrzeuginneren der beiden Fahrzeuge wurden sowohl die Schallsituation, als auch die Beschleunigung am Lenkrad und am Fahrersitz ermittelt, wobei Außen- und Innenmessungen an verschiedenen Tagen durchgeführt wurden.

Die Messungen wurden in 2 Messserien durchgeführt. Während bei Messserie 1 die Rumpelstreifen aus dem 1. Testfeld vermessen wurden, wurden beim 2. Testfeld emissions- bzw. immissionsseitig nur ausgewählte Rumpelstreifen betrachtet. Die Wirkungen im Fahrzeuginneren wurden dabei nicht nur von allen Rumpelstreifen des 2. Testfeldes, sondern zur Verifizierung der Wiederholbarkeit auch von den Rumpelstreifen des 1. Testfeldes erfasst.

Die Emissions- bzw. Immissionsmessungen umfassten Mikrofonmessungen (46AE, G.R.A.S.) in 7,5 m und in 25 m Entfernung zum Rumpelstreifen und in einer Höhe von 1,2 m über der Fahrbahnoberfläche. Zudem wurde am Immissionspunkt in 25 m Entfernung ein Kunstkopf (HMS IV, Head Acoustics) zur binauralen Erfassung des Schallfeldes eingesetzt (siehe Abbildung 2). Mit Hilfe einer Laserlichtschranke im Messquerschnitt und mit an den Fahrzeugen angebrachten Reflexionsstreifen wurde der Zeitpunkt des Passierens der Messquerschnittes ermittelt und die vorgesehenen Fahrzeuggeschwindigkeiten von 100 km/h (PKW) bzw. 80 km/h (LKW) kontrolliert.



Abbildung 2: Immissionsmessungen mit Mikrofon und Kunstkopf in 25 m Entfernung zum Rumpelstreifen und 1,2 m über der Fahrbahnoberfläche.

Die akustische Wirkung von Rumpelstreifen im Fahrzeuginneren wurde ebenfalls mit einem Mikrofon (46AE, G.R.A.S.) in der Fahrzeugmitte und dem Kunstkopf am bzw. neben dem Beifahrersitz erfasst (siehe Abbildung 3, links). Des Weiteren wurden mit einem 3-achsigen Miniatur-Beschleunigungssensor (66A11, Meggitt, siehe Abbildung 3, rechts) die Vibrationen am Lenkrad und mit einem 3-achsigen Ganzkörper-Sitzbeschleunigungsaufnehmer (SV 38, Svantek) die Vibrationen der Sitzfläche am Fahrersitz aufgezeichnet.

Bei allen Messungen wurden an den Fahrzeugen eine Videokamera (Hero 3+ bzw. Hero 4, GoPro) montiert. Dies erlaubt eine Beurteilung, inwieweit mit der Radlauffläche der Rumpelstreifen mittig bzw. vollständig überfahren wird.

Die Messungen fanden nur günstigen Witterungsbedingungen (trocken, geringer Wind) statt. Für die

anschließenden Auswertungen wurde jeder Rumpelstreifen mehrfach befahren: zwischen 10 und 24 Überfahrten bei den Außenmessungen und zwischen 14 und 21 Überfahrten bei den Innenmessungen.



Abbildung 3: Messung der akustischen Wirkung mit Kunstkopf und Mikrofon (links) und der hervorgerufenen Vibrationen am Lenkrad mit 3-achsigem Beschleunigungsaufnehmer (rechts) im PKW.

Simulation von Innen- und Außengeräuschen

Die Synthetisierung von Überfahrtsgeräuschen im Außenbereich erfolgte auf Basis der Messungen der zylindrischen Einzelfuge in Kombination mit einer Schallausbreitungsberechnung unter Verwendung der 2.5D Randlelementmethode [6]. Hierfür wurde der Einzelimpuls jeder Fuge als statisch angenommen. Bereiche über 2000 Hz konnten in den Berechnungen nicht reproduziert werden und wurden aus den Messungen teilweise übernommen. Die Anpassung an verschiedene Geometrien erfolgte durch aus den Messdaten gewonnene Filterfunktionen. Zusätzlich wurde das normale Fahrgeräusch überlagert, um einen möglichst natürlichen Klang zu erzeugen. Zeit- und Pegeldifferenz zwischen den beiden Ohren wurden unter Annahme einer Streuung einer ebenen Welle an einer Kugel künstlich eingefügt.

Für die im Prinzip ähnliche Synthetisierung im Innenbereich war keine Schallausbreitungsrechnung notwendig und es konnten direkt die Kunstkopfmessungen zur Modellierung verwendet werden. Weiters mussten die Einzelfugensignale aus einer inversen Filterung der Überfahrt des Pseudozufallsstreifens abgeleitet werden, da die Einzelfugenüberfahrten im Innenraum schwer bis gar nicht hörbar waren.

Wahrnehmungstests

Die Wahrnehmungstests wurden von 16 Probanden (9 weiblich und 7 männlich) mit einem durchschnittlichen Alter von $26 \pm 5,5$ Jahre in einem reflexionsarmen Raum (17 dB(A) Hintergrundpegel) durchgeführt. Zur Beurteilung der Innen- und Außengeräusche wurden drei verschiedene Parameter erhoben.

Lästigkeitsbeurteilung

Für die Lästigkeitsbeurteilung wurde eine freie Größenschätzung, d.h. ohne eine vorgegebene Referenzskala, durchgeführt [7][8], sodass die Probanden den Zahlenbereich frei wählen konnten. Einzige Vorgabe war, dass eine doppelt empfundene Lästigkeit als doppelt so hoher Zahlenwert abgebildet werden soll und dass Zahlen kleiner gleich 0 nicht zulässig sind. Es ist daher immer

möglich, eine größere Lästigkeit anzugeben, falls ein Stimulus lästiger ist als alle bisherigen.

Basis für die Lästigkeitsbeurteilung waren die Immissionsmessungen, wobei jeweils eine Überfahrt aus den jeweiligen gemessenen Bedingungen sowie ausgewählte, synthetisierten Stimuli verwendet wurden. Es wurden 4 Durchläufe durchgeführt, wobei in jedem Durchlauf jeder Stimulus mit einer Länge von 2,38 s (PKW) bzw. 2,97 s (LKW) zweimal enthalten war. Zwischen den Durchläufen mussten die Probanden mindestens 5 min Pause machen.

Dringlichkeitsbeurteilung

Im Gegensatz zur Lästigkeit, war bei der Dringlichkeit eine Beurteilung der Veränderung des Innengeräusches durchzuführen. Da eine solche Veränderung nicht vorhanden sein muss, ergibt sich automatisch ein Nullpunkt. Daher wurden die verschiedenen Bedingungen beim Innengeräusch auf einer vorgegeben Skala mit 5 Hauptkategorien (überhaupt nicht, wenig, mittelmäßig, sehr und äußerst dringlich) und 4 Zwischenstufen beurteilt.

Die Dauer der Stimuli betrug einheitlich 2,5 s, wobei 0,7 s zu Beginn des Stimulus reines Fahrgeräusch und erst die darauffolgenden 1,8 s das eigentliche Rumpelstreifen-geräusch beinhalteten, was in etwa der Dauer der (kürzeren) Überfahrt des PKW entspricht. Die Aufteilung in 4 Durchläufe mit je 2 Wiederholungen war ident zur Lästigkeitsbeurteilung.

Reaktionszeit

Beim Reaktionszeittest war ein dauerndes Fahrgeräusch vorhanden. und in Abständen, die zufällig zwischen 3 und 7,5 s variierten, wurden Rumpelstreifengeräusche jeweils mit einer Länge von 1,2 s vorgespielt. Die Probanden mussten dann so schnell wie möglich die Leertaste auf der Tastatur drücken. Um die Probanden sowohl kognitiv als auch motorisch zu beschäftigen und dadurch eine ähnliche Situation wie im Straßenverkehr zu simulieren, mussten sie während des Tests einem sich zufällig bewegenden Kreis mit der Maus folgen [9]. Dies wurde dadurch erschwert, dass diese Aufgabe mit der nichtdominanten Hand durchgeführt werden musste.

Da das Fahrgeräusch dauernd vorhanden war, wurden PKW und LKW getrennt betrachtet. Pro Fahrzeug wurden 6 Durchläufe durchgeführt, jeder davon beinhaltete 54 Rumpelstreifengeräusche in zufälliger Reihenfolge. Die resultierenden 12 Durchläufe waren für alle Probanden gleich, die Präsentation erfolgte aber in zufälliger und pro Proband unterschiedlicher Reihenfolge.

Ergebnisse

Fahrzeugkategorie

Ein direkter Vergleich von LKW und PKW bestätigt vor allem den Trend, dass im LKW nur relativ geringe Veränderungen des Pegels (L_{Aeq} im Bereich von 6 dB) und auch der anderen erhobenen, akustischen Parameter auftreten, während im PKW die Pegelerhöhungen teilweise auch sehr extrem ausfallen können (bis zu 19 dB wurden gemessen). Die Pegelunterschiede spiegeln sich auch in der ermittelten Dringlichkeit wider, da Rumpelstreifen-

überfahrten im PKW als deutlich dringlicher wahrgenommen werden als im LKW.

Auch die durch die Rumpelstreifen induzierten, und gemäß ISO 5349-1 frequenzgewichteten, Vibrationen am Lenkrad sind beim PKW deutlich höher als beim LKW. Die nach ISO 2631-1 bewerteten Sitzbeschleunigungen liegen grundsätzlich bei beiden Fahrzeugen auf ähnlichem Niveau. Jedoch zeigt eine Hochpassfilterung mit 25 Hz zur Unterdrückung dominanter, von den Rumpelstreifenüberfahrten unabhängiger Grundvibrationen, dass die relevanten Schwingungsanteile sehr geringe Werte aufweisen ($< 0,2 \text{ m/s}^2$), weshalb sie in der Ergebnisinterpretation nicht weiter berücksichtigt werden.

Rumpelstreifengeometrien

Werden die Fugenabstände von konventionellen Rumpelstreifen mit periodisch angeordneten Fugen bei sonst gleichem Fugenprofil größer gewählt, so ist aufgrund der Abnahme an Fugen je Längeneinheit von einer Verringerung der akustischen Auswirkungen auszugehen. Dies bestätigt sich zwar bei Betrachtung von 300 und 600 mm Abständen (aufgrund der Verdoppelung werden zum Teil gleiche Frequenzen zum Schwingen angeregt), jedoch weichen die Auswirkungen bei 400 mm Fugenabstand von diesem Zusammenhang ab. Im Gegensatz zur akustischen Wirkung sind die Veränderungen der gemäß ISO 5349-1 gewichteten Vibration am Lenkrad bei Rumpelstreifenüberfahrt bei einem Fugenabstand von 600 mm höher als bei einem Fugenabstand von 300 mm. Allerdings besteht hier ebenfalls keine allgemeine fugenabstandsabhängige Tendenz der Vibration, welche aus den Untersuchungsergebnissen abgeleitet werden könnte.

Durch die zufällige Variation des Fugenabstandes von konventionellen Rumpelstreifen konnte die tonale Komponente in den Schallimmissionen wirkungsvoll gegenüber den Rumpelstreifen mit regelmäßiger Fugenanordnung vermindert werden. Gleichzeitig werden jedoch – bei gleicher Fugentiefe und Form – deutlich höhere Schalldruckpegel hervorgerufen. Ein möglicher Grund ist eine breitbandigere Schwingungsanregung, wodurch möglicherweise Resonanzeffekte vermehrt auftreten.

Die mittleren Schallimmissionen von links- und rechtsgeneigten Rumpelstreifen zeigen bei den beiden Fahrzeugkategorien unterschiedliche Wirkung: während beim LKW tatsächlich die mittleren Immissionen bei Linksneigung um 1–2 dB geringer sind, besteht eine ähnliche Differenz jedoch mit umgekehrten Vorzeichen beim PKW. Zudem zeigte sich eine hohe Variabilität der Messergebnisse (zum Teil unterschiedliche Tendenzen bei den Innengeräuschen zwischen den Messserien), welche möglicherweise durch die starke Abhängigkeit der Anregung durch die zu- bzw. abnehmende Fugentiefe bei Querversatz während der Rumpelstreifenüberfahrt erklärt werden kann. Aufgrund dessen kann eine vorteilhafte Wirkung bei linksgeneigten Fugen nicht bestätigt werden.

Das Fehlen der Kante der Einzelfugen bei sinusförmigen Rumpelstreifen (durch starke Abrundung des Übergangs) vermindert die Anregungsintensität und führt gegenüber

konventionellen Rumpelstreifen bei gleicher Periodizität bzw. Wellenlänge und Fugentiefe meist zu geringeren akustischen Auswirkungen – innen wie außen. Bei einer großen Wellenlänge von 600 mm ist dies stets deutlich ausgeprägt und führt sowohl bei gerader wie auch bei gewölbter Frästrommel dazu, dass sich Schallemissionen und -immissionen, wie auch die Geräusche im Inneren kaum (LKW) oder nur geringfügig um wenige Dezibel (PKW) erhöhen. Der geringe akustische Effekt spiegelt sich auch in den geringen Unterschieden der Lästigkeits- und Dringlichkeitsurteilen gegenüber dem normalen Fahrgeräusch, sowie den deutlich erhöhten Reaktionszeiten bis hin zum gänzlichen Ausbleiben von Reaktionen wider. Hingegen befinden sich die gewichteten Vibrationen am Lenkrad gegenüber konventionellen Rumpelstreifen auf ähnlichem oder geringfügig niedrigerem Niveau.

Zusammenfassung und Diskussion

Die Untersuchungen verdeutlichen die Vielschichtigkeit von Einflüssen, welche zum Teil zu deutlichen Unterschieden in der Wirkung von Rumpelstreifen führen können und deren Ursachen unklar sind. Andere Fahrzeuge (auch der gleichen Kategorie) können sich aufgrund unterschiedlicher Konstruktion und aufgrund der daraus resultierenden Eigenschaften im Hinblick auf Schwingungsanregung, -übertragung und -abstrahlung sehr unterschiedlich verhalten. Aus theoretischen, physikalischen Überlegungen konnten zwar grundlegende Tendenzen abgeleitet werden (beispielsweise längerer Abstand sollte leiser werden), jedoch dürften fahrzeugspezifische Eigenschaften (wie Resonanzen) diese Trends überlagern, sodass sich selbst grundlegende Trends umkehren können.

Eine Verallgemeinerung der Einzelergebnisse, welche für die eingesetzten Fahrzeuge (und für die während der Messungen vorherrschenden Rahmenbedingungen) gelten, auf alle in Österreich verkehrenden Fahrzeuge und auftretenden Rahmenbedingungen ist demzufolge nur sehr eingeschränkt möglich. Sehr wohl konnten jedoch die folgenden, grundlegenden Zusammenhänge anhand der Ergebnisse identifiziert werden, welche für die zukünftige Auswahl von Rumpelstreifen hilfreich sein können.

Es zeigte sich sehr deutlich, dass die Warnwirkung im LKW deutlich geringer ist als im PKW. Dies steht im Einklang mit bisherigen Erkenntnissen einer reduzierten, sowohl akustischen als auch taktilen Wirkung in Lastkraftwagen [11][12]. Die Pegelerhöhungen im LKW liegen größtenteils über der in realistischen Umgebungen allgemein als Wahrnehmungsschwelle angenommenen Pegeldifferenz von 3 dB. Allerdings können vermutlich Änderungen in der akustischen Umgebung (z.B. Radio eingeschaltet) die Pegeldifferenz unter diese Schwelle senken. Zudem werden laut Donnell et al. [3] Erhöhungen erst im Bereich von ca. 10 dB als alarmierend wahrgenommen. Auf der anderen Seite steigt bereits ab Pegelanstiegen über 15 dB – Erhöhungen, die im PKW zum Teil vorhanden waren – die Gefahr einer Schreckreaktion [3]. Dies veranschaulicht die gegenläufigen Anforderungen für eine akustische Warnung bei der Auslegung von Rumpelstreifen.

Des Weiteren sind Innen- und Außengeräuschen stark korreliert, sodass eine Senkung des Außenpegels in der Regel mit einer Senkung des Innengeräusches einhergeht. Speziell Rumpelstreifen mit sinusförmigem Längsprofil weisen bei ausreichend großer Wellenlänge eine starke Verminderung der akustischen Schallabstrahlung bei meist vergleichbaren Vibrationen am Lenkrad auf. Allerdings muss abgewogen werden, inwieweit die aufmerksamkeitssteigernde Wirkung bei Entfall der akustischen Komponente bestehen bleibt.

Literatur

- [1] Lerner, M., Hegewald, A., Löhe, U., Velling, H.: Sicherheitswirkung eingefräster Rüttelstreifen entlang der BAB A 24, Bericht zum gleichnamigen Forschungsprojekt AP 3610. Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft V177, Wirtschaftsverlag NW, Bergisch Gladbach, 2009, ISBN 978-3-86509-896-3
- [2] Chen, C., Darko E.O., Richardson, T.N.: Optimal Continuous Shoulder Rumble Strips and the Effects on Highway Safety and the Economy. ITE Journal, 2003, S. 30-41
- [3] Donnell, E.T., Sommer, H.J., Garvey, P.M., Himes S.C., Torbic, D.J.: Statistical model of in-vehicle sound generated from highway rumble strips. International Journal of Vehicle Noise and Vibration, Vol. 5, Nr. 4, 2009, S. 308-328
- [4] Delaware Departement of Transportation: SR 24 Longitudinal Edge Line Rumble Strip. 2012
- [5] Perrillo, K.: The Effectiveness and Use of Continuous Shoulder Rumble Strips. Albany, New York, 1998
- [6] Kasess, Ch., Kreuzer, W., Waubke, H.: An efficient quadrature for 2.5D boundary element calculations. Journal of Sound and Vibration, Vol. 382, 2016, S. 213-226
- [7] Nilsson, M.E., Andéhn M., Lešna, P.: Evaluating roadside noise barriers using an annoyance-reduction criterion. The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 124, Nr. 6, 2008, S. 3561-3567
- [8] Lane, H.L., Catania, A.C., Stevens, S. S.: Voice Level: Autophonic Scale, Perceived Loudness, and Effects of Sidetone. The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 33, Nr. 160, 1961, S. 160-167
- [9] Suied, C., Susini, P., McAdams, S.: Evaluating warning sound urgency with reaction times. Journal of Experimental Psychology Applied, Vol. 14, Nr. 3, 2008
- [10] Miles, J., Finley, M.: Factors That Influence the Effectiveness of Rumble Strip Design. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 2030, 2007, S. 1-9
- [11] Bucko, T.: Evaluation of Milled-In Rumble Strips, Rolled-In Rumble Strips and Audible Edge Stripes.