

Vorhersage der Detektionsfähigkeit von synthetischen Fahrzeuggeräuschen mittels logistischer Regression

Lisa Steinbach, M. Schmidt, M. Ercan Altinsoy

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

Email: lisa.steinbach@tu-dresden.de

Einleitung

Die zunehmende Anzahl von Hybrid- und Elektrofahrzeugen birgt neben positiven Umweltaspekten, wie der reduzierten Schadstoffemission, gerade für schwächere Verkehrsteilnehmer wie Fußgänger und Radfahrer, insbesondere aber für Kinder und Blinde, erhebliche Risiken, da diese Fahrzeuge bei niedrigen Geschwindigkeiten nahezu lautlos fahren. Um dieses Risiko für schwächere Verkehrsteilnehmer zu reduzieren, sollen leise Fahrzeuge bei niedrigen Geschwindigkeiten zukünftig künstlich erzeugte Geräusche abstrahlen. Dazu wurden von verschiedenen nationalen und internationalen Behörden bereits Vorgaben bezüglich des Geräuschcharakters definiert und teilweise gesetzlich vorgeschrieben. Die Herausforderung in der Realisierung eines Warngeräusches für elektrisch angetriebene Fahrzeuge besteht somit in der Vereinbarung unterschiedlicher Ziele innerhalb eines Geräusches. Es muss auf schwächere Verkehrsteilnehmer warnend wirken und Informationen, bspw. bezüglich des Fahrzeugbetriebszustandes, übermitteln. Gleichzeitig darf es nicht lästig klingen und muss mit dem zugehörigen Fahrzeug einen ästhetischen Gesamteindruck vermitteln (vgl. [1]). Die Detektionsfähigkeit eines Warngeräusches aus einem Hintergrundgeräusch ist für die Funktionserfüllung eines solchen Geräusches essentiell. Üblicherweise werden psychoakustische Untersuchungen mit einem geeigneten Probandenpool durchgeführt, um eine Aussage über die Detektionsfähigkeit treffen zu können. In dieser Arbeit wurde ein Modell für die Schätzung der Detektionsfähigkeit auf Basis einer logistischen Regression ermittelt. Als Maß hierfür wurde in den Hörversuchen die Detektionszeit definiert und in Abhängigkeit diverser Parameter untersucht. Als unabhängige Variablen werden die variierten Parameter Bänder- bzw. Tonanzahl, A-bewerteter Schalldruckpegel sowie die psychoakustischen Größen Rauigkeit, Schwankungsstärke, Tonhaltigkeit, Schärfe und Lautheit definiert.

Stimuli

Für die Geräuschgenerierung dieses Hörversuchs wurde in einem ersten Schritt eine Frequenzkarte erstellt. Dabei handelt es sich um eine grafische Darstellung eines definierten Frequenzbereiches, in dem die Regularien, Anforderungen und Erkenntnisse hinsichtlich Warngeräuschen für leise Fahrzeuge berücksichtigt werden (vgl. Abbildung 1). Die UNECE gibt als zulässigen Frequenzbereich eines Warngeräusches die 1/3-Oktavbänder im Frequenzbereich von 160 Hz bis 5 kHz vor. Die grafische Darstellung des zulässigen Frequenzbereiches nach

UNECE bildet den Ausgangspunkt der Frequenzkarte. Sowohl von der UNECE als auch von der National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) werden darüber hinaus Bereiche vorgeschrieben, in denen mindestens ein 1/3-Oktavband zu nutzen ist. Die Abstrahlung tiefer Frequenzen (unter 250 Hz) stellt sich als technisch aufwendiger zu realisieren dar als die Abstrahlung jener in der Frequenzkarte darüber liegenden Frequenzen. Hohe Frequenzen führen zu einer erhöhten Lästigkeitsempfindung und sind darüber hinaus für ältere Verkehrsteilnehmer aufgrund altersbedingter Hörverluste schlecht wahrnehmbar (grauer Bereich). Hinzu kommen Frequenzen, die aus physiologischen Aspekten oder aufgrund des Spektrums typischer Hintergrundgeräusche (roter Bereich) vermieden werden sollten. Ebenso erfolgt die Berücksichtigung der für die Detektion zu empfehlenden Frequenzen (grüner Bereich) auf Basis vorhergehender Studien. Die Frequenzkarte verdeutlicht, welcher Frequenzbereich für ein geeignetes Warngeräusch für Elektrofahrzeuge von Vorteil ist. Bei der Erzeugung der zu untersuchenden Geräusche soll dieser Bereich im Folgenden berücksichtigt werden.

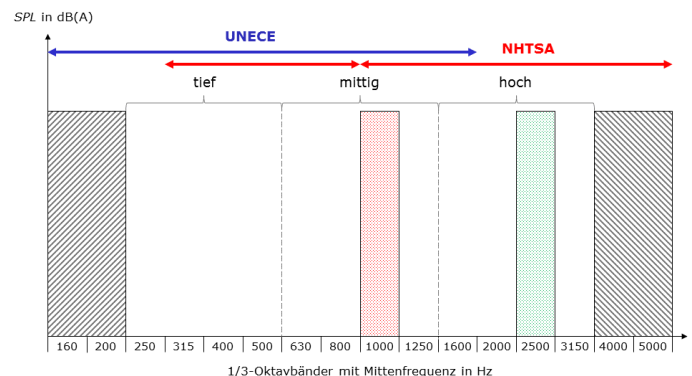


Abbildung 1: Visualisierung der Frequenzkarte zur Erzeugung geeigneter Warngeräusche für Elektrofahrzeuge.

Zur Durchführung der Hörversuche wurden die 138 zu bewertenden Stimuli mit einer Länge von 10 s zunächst generiert. Hierzu stand an der Professur für Akustik und Haptik der Technischen Universität Dresden ein Pure-Data-Patch (PD) zur Verfügung. Dieses wurde im Rahmen einer Studie der Bundesanstalt für Straßenwesen genutzt und für die vorliegende Arbeit entsprechend angepasst und erweitert. Das Patch ermöglicht die Einstellung mehrerer Schmalbandrauschen (SBR) sowie Einzel- bzw. reiner Sinustöne mit verschiedenen Frequenzen und Schalldruckpegeln. Darüber hinaus sind

diverse Fahrzyklen wie bspw. Fahrten mit konstanter Geschwindigkeit, Beschleunigung, Verzögerung, Anfahren und -halten sowie Abbiegevorgänge in verschiedenen Abständen zum Fahrzeug implementiert. Das Patch ermöglicht die direkte Ausgabe von WAV-Dateien für den gewählten Fahrzyklus. Geräuschkonfigurationen können im Patch gespeichert und somit wieder aufgerufen bzw. geladen werden. Insgesamt wurden drei unterschiedliche Geräuschcharaktere der Signale generiert: Schmalbandrauschen, reine Sinustöne und reine Sinustöne über Schmalbandrauschen. Abbildung 2 visualisiert die drei generierten Geräuschcharaktere am Beispiel eines zwei-bandigen Geräusches. Die Sinustöne über Schmalbandrauschen weisen nach Hastings einen tone-to-noise-ratio (TNR) von 9 dB auf [2]. Die Frequenz der reinen Sinustöne resultiert aus der Mittenfrequenz des jeweils verwendeten 1/3-Oktavbandes. Die Lage des Geräusches in der Frequenzkarte wird in tiefe, mittlere und hohe Frequenzen unterschieden. Hinzu kommen Geräusche, die sich vom tiefen zum mittleren, vom mittleren zum hohen oder über den gesamten Frequenzbereich erstrecken.

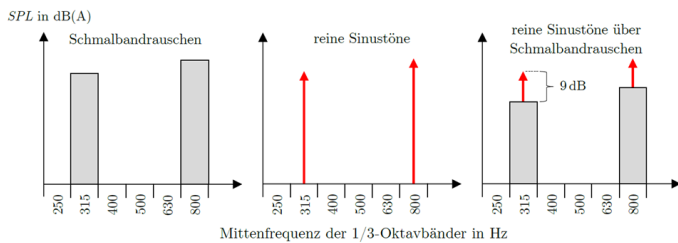


Abbildung 2: Visualisierung der drei im Versuch verwendeten Geräuschcharaktere am Beispiel eines zwei-bandigen Geräusches

Zusätzlich wurden Geräusche generiert, die dem Geräuschcharakter „reine Sinustöne über Schmalbandrauschen“ entsprechen und jeweils zwei Sinustöne pro SBR enthalten. Diese wurden symmetrisch um die Mittenfrequenz der 1/3-Oktavbänder angeordnet. Die Fre-

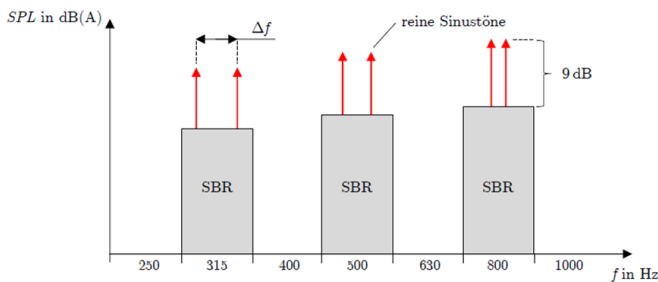


Abbildung 3: Visualisierung der Frequenzdifferenz Δf zwischen den verwendeten reinen Sinustönen über Schmalbandrauschen

quenzdifferenz Δf beider Sinustöne wurde entsprechend der Motorengeräusche von Verbrennungs- und Elektrofahrzeugen in drei Ausprägungen variiert. Eine Frequenzdifferenz von 20 Hz kommt dabei der R-Rauigkeit bzw. dem „Kollern“ eines Verbrennungsmotors nahe. Durch die Nutzung einer Differenz von 30 Hz soll die dominante Motorordnung eines Vierzylinders suggeriert werden.

Darüber hinaus wird eine Frequenzdifferenz von 50 Hz genutzt. Diese ähnelt dem Klang eines Elektromotors bzw. -fahrzeuges. Durch die Nutzung der beschriebenen Frequenzdifferenzen steigt auch die Schwankungsstärke bzw. Rauigkeit der Geräusche.

Versuchsdurchführung

Für den Hörversuch wurde ein definiertes Versuchsszenario gewählt (vgl. [3]). Ein elektrisch fahrendes Fahrzeug biegt aus einer vielbefahrenen Hauptstraße (Hintergrundgeräusch: 55 dB(A) in eine ruhige Seitenstraße und nähert sich dem am Straßenrand stehenden Probanden. Zur Berechnung des notwendigen Detektionszeitpunktes wird der kritische Abstand nach Kerber genutzt [4]. Für eine konstante Fahrzeuggeschwindigkeit von 10 km/h ergibt sich für einen unkonzentrierten Fahrzeugführer so ein kritischer Abstand 4,65 m. Zur Beurteilung der intraindividuellen Schwankungen unterliegt der Detektionsversuch zudem einer Wiederholung. Die Reihenfolge der Stimuli-Präsentation wurde randomisiert. Der Hörversuch wurde in einer schallisolierten Hörkabine über einen Kopfhörer der Firma Sennheiser vom Typ HD 600 kalibriert dargeboten. Im Versuchs-Setup wurden alle determinierten Delays bestimmt und kompensiert. Die Benutzeroberfläche wurde mit Matlab-GUI implementiert. Dem eigentlichen Hörversuch wurde ein Training vorangestellt, damit sich die Probanden gut einhören konnten. Zusätzlich erhielten sie vom Versuchsleiter Erläuterungen zur gehörten Verkehrsszene. An dem Hörversuch nahmen insgesamt 44 normalhörende Personen (24 männlich, 20 weiblich) im Alter von 20 bis 79 Jahren teil. Das Durchschnittsalter der Probanden betrug 27,8 Jahre.

Ergebnisse

Abbildung 4 zeigt die Reaktionszeiten aller 44 Probanden für 24 Geräusche in Form von Boxplots. Diese Geräusche weisen den gleichen Schalldruckpegel auf, aber unterscheiden sich in ihrem Geräuschcharakter. Die kritischen Detektionszeitpunkte nach Kerber für

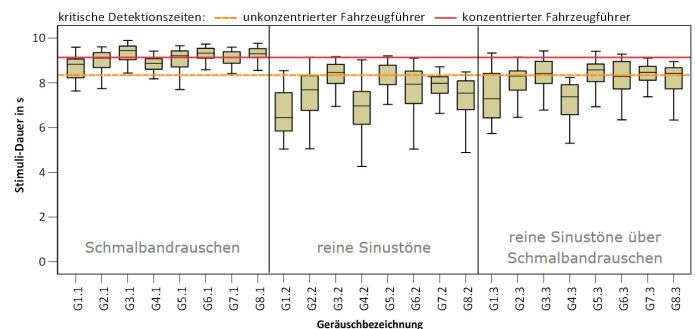


Abbildung 4: Boxplots der Geräuschdetektionszeiten für Stimuli mit gleichem Schalldruckpegel in Geräuschcharaktere gruppiert

konzentrierte (rot) und unkonzentrierte (orange) Fahrzeugführer sind farblich gekennzeichnet (vgl.[4]). Um einen möglichen Unfall zu vermeiden, sollte die Detektion früh genug möglich sein und die Boxplots sollten

sich unterhalb der farbigen Linien befinden. Die Ergebnisse zeigen, dass der Geräuschcharakter die Detektionsfähigkeit des Geräusches signifikant ($p < 0.001$) beeinflusst. Der folgende paarweise Vergleich wird Bonferroni-korrigiert, wodurch das Signifikanzniveau auf $\alpha = 0.0167$ sinkt. Bei den Geräuschen mit gleichem Schalldruckpegel ($p < 0.001$) ist Schmalbandrauschen ($m^1 = 9.29$, $CI^2 = 0.045$) signifikant später detektierbar als reine Sinustöne ($p < 0.001$, $m = 8.08$, $CI = 0.096$) und reine Sinustöne über Schmalbandrauschen ($p < 0.001$, $m = 8, 49$, $CI = 0.075$). Letztere sind darüber hinaus signifikant eher detektierbar ($p < 0.001$) als ausschließlich reine Sinustöne.

Logistische Regression

Das Ziel der logistischen Regression ist die Ermittlung der Eintretenswahrscheinlichkeit der Detektionsfähigkeit in Abhängigkeit verschiedener Einflussgrößen. Generell gilt die logistische Regression als robustes Klassifikationsverfahren, welches eine abhängige binäre Variable (ja oder nein) erklärt. Die Regression basiert auf der Maximum-Likelihood-Schätzung und erzeugt im Vergleich zur linearen Regression keine Gerade als Funktionskurve. Der sogenannte Klassifikationstrennwert entscheidet, ab welcher Wahrscheinlichkeit ein Geräusch als sicher detektierbar gilt. Ausgehend vom kritischen Abstand und der Reaktionszeit für unkonzentrierte Fahrzeugführer nach Green [6] wird eine Detektions-ID (Det-ID) definiert, die für eine rechtzeitige Detektion des Fahrzeuggeräusches den Wert 1, für alle weiteren Detektionszeiten den Wert 0 annimmt. In dem vorliegenden Hörversuch entsprechen 83,55% der Einzeldetektionszeiten einer Det-ID von 1. Als unabhängige Variablen wurden die variierten Parameter Bänder- bzw. Tonanzahl, A-bewerteter Schalldruckpegel sowie die psychoakustischen Größen Rauigkeit, Schwankungsstärke, Tonhaltigkeit, Schärfe und Lautheit definiert. Die psychoakustischen Parameter der Geräusche wurden über die Software ArtemiS von HEAD acoustics GmbH ermittelt. Die Lautheitsbestimmung entspricht in der vorliegenden Arbeit jener der 2010 überarbeiteten Lautheitsberechnung der DIN 45631/A1. Die Bestimmung der Schärfe erfolgte nach Aures. Die Berechnungsvorschrift nach Aures berücksichtigt die absolute Lautheit des Geräusches. Die Bestimmung der Signallautheit als Parameter der Schärfberechnung erfolgt ebenfalls nach DIN 45631/A1. Bei den verbleibenden psychoakustischen Parametern Schwankungsstärke, Rauigkeit (auf Basis von Terhardt, Vogel, Kemp) und Tonhaltigkeit erfolgte die Bestimmung somit über die implementierten Berechnungsvorschriften, die den angegebenen Literaturhinweisen zu entnehmen sind [5]. Bei den psychoakustischen Parametern handelt es sich stets um die Maximalwerte dieser. Die Regressionskoeffizienten der Parameter der logistischen Regressionsfunktion sind in Tabelle 1 aufgetragen.

Unter Berücksichtigung der Regressionskoeffizienten

¹ m =Median

²Die Bestimmung der 95%-Konfidenzintervalle (CI) erfolgte aufgrund der nicht vorliegenden Normalverteilung nach McGill [7].

Tabelle 1: Regressionskoeffizienten der Parameter der logistischen Regressionsfunktion zur vorherigen Bestimmung der Detektionswahrscheinlichkeit

Parameter der Regressionsfunktion	Regressionskoeffizient	
	Bezeichner	Wert
Schwankungsstärke	β_{Fls}	36.907
Rauigkeit	β_R	-1.0025
Schärfe	β_S	1.838
Tonhaltigkeit	β_{Ton}	0.138
Lautheit	β_N	-0.173
A-bewerteter Schalldruckpegel	β_{SPL}	0.937
Bänderanzahl	β_{3rdOct}	0.092
Konstante	β_0	-55.136

folgt die nachstehende logistische Regressionsfunktion.

$$P(\text{DetID}=1) = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_F \cdot F + \beta_R \cdot R + \beta_{Ton} \cdot Ton + \beta_N \cdot N + \beta_{3rdOct} \cdot N_{3rdOct} + \beta_{SPL} \cdot SPL)}}$$

Verifikation

Durchführung

Zur Verifikation der ermittelten Ergebnisse wurden für einen virtuellen Feldversuch im Multimodalen Meslabor (MMM) des Institutes ausgewählte Stimuli berücksichtigt. Diese sollten bezüglich ihrer Detektionszeiten signifikante Unterschiede aufweisen. Aus dem bisherigen Kopfhörerversuch wurden vier nicht rechtzeitig (NR) sowie vier rechtzeitig detektierbare (R) Geräusche ausgewählt. Hinzu kamen vier weitere Stimuli, die bezüglich der Rechtzeitigkeit ihrer Detektion als „Grenzfall“ (G) betrachtet werden können.

Tabelle 2: Ausgewählte Stimuli und die zugehörigen P-Werte der logistischen Regressionsfunktion

Geräusch	Gruppe	P(DetID=1)
Geräusch 01	NR	16.98%
Geräusch 02	NR	50.85%
Geräusch 03	NR	87.48%
Geräusch 04	NR	89.00%
Geräusch 05	G	52.62%
Geräusch 06	G	54.67%
Geräusch 07	G	90.79%
Geräusch 08	G	90.64%
Geräusch 09	R	99.99%
Geräusch 10	R	99.43%
Geräusch 11	R	96.02%
Geräusch 12	R	93.38%

Der Klassifikationstrennwert entscheidet, ab welcher Wahrscheinlichkeit ein Geräusch als sicher detektierbar gilt (DetID = 1) [8]. Allen Geräuschen mit niedrigerem P-Wert wird somit eine DetID mit dem Wert 0 zugewiesen. Tabelle 2 zeigt, dass der Klassifikationstrennwert entsprechend hoch gewählt werden muss. Für einen Klassifikationstrennwert von 93,38%, entsprechend

dem vollständig rechtzeitig detektierbaren Geräusch 12, werden 94% der nicht rechtzeitigen Detektionszeiten korrekt identifiziert. Da nur die Identifikation dieser Geräusche sicherheitstechnisch relevant ist, kann der geringe Anteil (40,7%) an korrekt identifizierten, rechtzeitig detektierbaren Geräuschen vernachlässigt werden. Zur vollständigen Verifikation der gewonnenen Ergebnisse sowie der hergeleiteten logistischen Regressionsfunktion wurden neben den 12 Stimuli aus dem Kopfhörerversuch auch 12 neue Stimuli generiert und in den virtuellen Feldversuch implementiert. Als Geräuschcharakter für diese Zusatzgeräusche wurde Sinustöne über Schmalbandrauschen gewählt. Zu den bereits genutzten Frequenzabständen Δf (20 Hz; 30 Hz; 50 Hz) wurden nun noch 10 Hz und 70 Hz genutzt. Für die so generierten Geräusche wurde die Detektionswahrscheinlichkeit mithilfe der oberhalb dargestellten logistischen Regressionsfunktion ermittelt. Anschließend wurden jene Geräusche mit der höchsten und niedrigsten Detektionswahrscheinlichkeit für den virtuellen Feldversuch übernommen. So dass im virtuellen Hörversuch insgesamt 24 verschiedene Stimuli untersucht wurden. Am virtuellen Feldversuch nahmen zur Verifikation der Ergebnisse 20 Personen im Alter von 20 bis 54 Jahren (Durchschnittsalter: 27,9 Jahre) teil. Es nahmen neun weibliche und elf männliche Personen teil.

Ergebnisse

Zur Zuweisung der resultierenden Detektions-ID (Det-ID) in Abhängigkeit der im virtuellen Feldversuch gewonnenen Ergebnisse erfolgte für die Geräusche die Addition von Median und Konfidenzintervall. Für Summen unterhalb des kritischen Abstandes für unkonzentrierte Fahrzeugführer (8,34 s) folgte eine Det-ID von Eins. Spätere bzw. größere Detektionszeiten stehen repräsentativ für eine unzureichende Detektionsfähigkeit und erhielten eine Det-ID von Null. Von den zwölf Geräuschen aus dem Kopfhörerversuch ist Geräusch 03 mit einer Wahrscheinlichkeit von 87,48 % rechtzeitig detektierbar. Diese ist die niedrigste ermittelte Wahrscheinlichkeit einer sicheren Detektion. Zur Auswertung des virtuellen Feldversuches wurde der Klassifikationsstrennwert entsprechend angepasst. Für den korrigierten Klassifikationsstrennwert von 87,48 % wurde für elf der zwölf Geräusche (90,9 %) die Detektions-ID korrekt vorhergesagt. Von den zwölf extra für den virtuellen Feldversuch generierten Geräuschen ist lediglich eine Vorhersage (8,3 %) fehlerhaft. Die Geräusche wurden im virtuellen Feldversuch signifikant 0,8 s später als in dem vorherigen Kopfhörerversuch detektiert ($z = -3.485$, $p < 0.001$). Dies entspricht auch der verbalen Versuchsbewertung der Probanden. Diese berichteten, dass es ihnen gegenüber den Kopfhörerversuchen im virtuellen Feldversuch schwerer fiel, das Fahrzeuggeräusch aus dem Hintergrundgeräusch zu detektieren. Als Ursache wurde stets die realistischere Versuchsdarstellung angegeben. Das oberhalb beschriebene Räumlichkeitsgefühl und die Stimuli-Präsentation mittels Wellenfeldsynthese weisen somit signifikante Einflüsse auf die Detektionsfähigkeit

der Geräusche auf.

Zusammenfassung und Ausblick

Bei der Untersuchung der Detektionsfähigkeit von möglichen Warngeräuschen ist ein virtueller bzw. realer Feldversuch Kopfhörerversuchen vorzuziehen. Die geringe Gesamtfehlerquote der Vorhersage der Detektions-ID durch die logistische Regressionsfunktion verifiziert die aus dem Kopfhörerversuch ermittelten Einflüsse der physikalischen und psychoakustischen Parameter dennoch.

Literatur

- [1] Steinbach, L., Altinsoy M.E. (2018): Elektromobilität: Die Chance die Sicherheit zu erhöhen und gleichzeitig den Verkehrslärm zu reduzieren, Zeitschrift für Lärmbekämpfung, 2/2018, S. 44-49.
- [2] Hastings, A., McInnis, C. (2015): Detectibility of Alert Signals for Hybrid and Electric Vehicles: Acoustic Modeling and Human Subjects Experiments Washington DC: DOT/NHTSA.
- [3] Steinbach, L., Altinsoy, M.E., Rosenkranz, R. (2017): Evaluation of Multiple Electric Vehicle Sources and New Concepts Regarding Speed-Dependency, Technical Report, SAE Technical Paper.
- [4] Kerber, S. (2008): Wahrnehmbarkeit von Fahrzeugaußengeräuschen in Hintergrund-geräuschen: Psychoakustische Beurteilung und modellbasierte Prognosen (Dissertation). Technische Universität München.
- [5] HEAD acoustics (2016): Psychoakustik II. Berechnung psychoakustischer Parameter in der ArtemiS SUITE [online], URL: https://www.head-acoustics.de/downloads/de/application_notes/Psychoakustische-Analysen_II_d.pdf (02.08.2017).
- [6] Green, M. (2000): How Long Does It Take To Stop? Methodological Analysis of Driver Perception-Brake Times. In: Transportation Human Factors, Jg. 2 Nr. 3, S. 195-216.
- [7] McGill, R., Tukey, J. W., Larsen, W. A. (1978): Variations of Box Plots. In: The American Statistician, Jg. 32 Nr. 1, S. 12-16.
- [8] Universität Zürich (2016): Methodenberatung - Datenanalyse [online]. URL: <http://www.methodenberatung.uzh.ch/de/datenanalyse.html> (23.05.2017).