

Stationär-Geräusch von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Fahrzeugtechnik Heft F 134

bast

Stationär-Geräusch von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen

**Einfluss eines künstlich erzeugten
Stationär-Geräuschs von elektrisch
angetriebenen Fahrzeugen auf die
Sicherheit von schwächeren
Verkehrsteilnehmern**

von

Ercan Altinsoy
Margitta Lachmann
Robert Rosenkranz
Lisa Steinbach

Technische Universität Dresden
Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
Institut für Akustik und Sprachkommunikation
Lehrstuhl für Akustik und Haptik

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Fahrzeugtechnik Heft F 134

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

- A - Allgemeines
- B - Brücken- und Ingenieurbau
- F - Fahrzeugtechnik
- M - Mensch und Sicherheit
- S - Straßenbau
- V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Berichte der **Bundesanstalt für Straßenwesen** (BAST) stehen zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BAST-Archiv ELBA zur Verfügung. <https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE 82.0665/2016
Stationär-Geräusch von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen – Einfluss eines künstlich erzeugten Stationär-Geräuschs von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen auf die Sicherheit von schwächeren Verkehrsteilnehmern

Fachbetreuung
Maxim Bierbach

Referat
Aktive Fahrzeugsicherheit und Fahrerassistenzsysteme

Herausgeber
Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion
Stabsstelle Presse und Kommunikation

Druck und Verlag
Fachverlag NW in der
Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9307
ISBN 978-3-95606-518-7

Bergisch Gladbach, Juli 2020



Kurzfassung – Abstract

Stationär-Geräusch von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen – Einfluss eines künstlich erzeugten Stationär-Geräuschs von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen auf die Sicherheit von schwächeren Verkehrsteilnehmern

Vor dem Hintergrund des zunehmenden Einsatzes von Elektrofahrzeugen im Straßenverkehr besteht ein wachsender Bedarf zur Bestimmung der Wahrnehmbarkeit von Fahrzeuggeräuschen durch Fußgänger, da sich Elektrofahrzeuge bei niedriger Geschwindigkeit nahezu lautlos bewegen. Ziel des Projektes ist die Erarbeitung von Aussagen über den Einfluss eines künstlich erzeugten Stationär-Geräuschs von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen auf die Sicherheit. Des Weiteren wurde erarbeitet, ob ein Stationär-Geräusch zur Vermeidung von Unfällen beitragen kann. Dazu wurden verschiedene sicherheitsrelevante Verkehrssituationen, verschiedene Stationär-Geräusche und auch Fahrgeräusche herangezogen. Für die Stationär-Geräusche wurden zwei Fahrgeräusche (UN-konformes Fahrgeräusch und US-konformes Fahrgeräusch) jeweils als Basis herangezogen und zusätzlich der Frequenzsprung durch prozentuale Frequenzänderung, eine Variation der Rauigkeit durch Veränderung der Frequenzabstände der tonalen Komponenten und ein Gesamtpegelsprung beim Wechsel von Stationär- auf Fahrgeräusch variiert, sodass insgesamt 58 verschiedene Geräusch-Variationen in drei Verkehrssituationen untersucht wurden. Insgesamt nahmen 40 Probanden (davon 20 Blinde und Sehbeeinträchtigte) an der Laborstudie teil. Sowohl in den Laboruntersuchungen, als auch im anschließenden Feldversuch mit Vertretern des Europäischen Blindenverbandes, der Autoindustrie, des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, der Bundesanstalt für Straßenwesen und Anwohnern wurde gezeigt, dass nicht generell jedes Stationär-Geräusch in jeder Fahrsituation zu einer besseren Detektion führt. Einige Stationär-Geräusche zeigen sowohl bei Normsehenden als auch bei blinden und sehbeeinträchtigten Personen signifikante Effekte bezüglich der Detektionsfähigkeit. Es wurde gezeigt, dass deutliche Unterschiede zwischen Fahr- und Stationär-Geräusch z. B. durch Pegelsprung oder Frequenzsprung die Detektionsfähigkeit begünstigen.

Stationary sound of electrically powered vehicles – Influence of an artificially produced stationary sound of electrically powered vehicles on the safety of visually impaired pedestrians

Due to the increasing use of electric vehicles in road traffic, there is a growing need to determine the perceptibility of vehicle sounds by pedestrians, since electric vehicles move almost silently at low speed. The aim of this project was to develop statements on the influence of an artificially generated stationary sound of electrically driven vehicles on safety. Furthermore, it was investigated whether a stationary sound can contribute to the avoidance of accidents. Various safety-related traffic situations, various stationary sounds and driving sounds were used for listening tests. For the stationary sounds, two driving sounds (UN-compliant driving sound and US-compliant driving sound) were used as a basis and additionally the frequency jump by percentage frequency change, a variation of the roughness by changing the frequency spacings of the tonal components and a total level jump when switching from stationary to driving sound varied so that a total of 58 different sound variations were examined in three traffic situations. A total of 40 subjects (including 20 blind and partially sighted) participated in the laboratory study. Both in the laboratory tests and in the subsequent field test with representatives of the European Blind Association, the automobile industry, the Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure, the Federal Highway Research Institute, it was shown that not every stationary sound in every driving situation leads to a better detection. Some sounds show significant effects in terms of detection capability for both the sighted and blind/partially sighted subjects. It has been shown that clear differences between driving and stationary sound, e.g. level jump or frequency jump positively influence the detectability.

Summary

Stationary sound of electrically powered vehicles – Influence of an artificially produced stationary sound of electrically powered vehicles on the safety of visually impaired pedestrians

1 Introduction

In everyday life pedestrians are exposed to traffic sounds in multifarious situations as motor vehicles play an indispensable role for transportation in today's societies. Each vehicle has certain technical features, which communicate different characteristics of vehicle models and types. They include, for example, technically-mechanical processes of different operating states, which influence the emitted sounds. These sounds are audible especially for pedestrians.

Thus the perceived sound has an information character: it indicates acceleration, deceleration and speed of the vehicle. Given the increasing use of electric vehicles in road traffic, there is a growing demand for the determination of the perceptibility of vehicle exterior sound by pedestrians, as the electric vehicles move almost silently up to a speed of 20 km/h. This low sound emission results in an increased risk potential, especially for weaker road users.

The aim of this project was to gather information on the influence of artificially generated stationary sound of electrically driven vehicles on the safety of weaker traffic participants. Furthermore, the aim was to be investigated whether a stationary sound can contribute to the prevention of accidents. Various safety-relevant traffic situations, different stationary sounds and also vehicle sounds were used for this purpose.

2 State of regulation

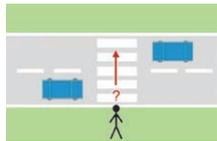
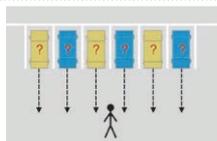
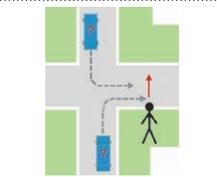
In September 2009, the NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) published a technical report on the incidence of accidents involving hybrid and electric vehicles with pedestrians and cyclists

[1]. The results show that electric vehicles are involved twice as often as vehicles with internal combustion engines in accidents with pedestrians, especially when the vehicle is moving backwards, decelerates/stops, starts in traffic, and in parking situations. In [2] and [3] the NHTSA carried out detection tests with two background noises and different driving cycles and published concepts for vehicle sounds.

The United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) also decided that new electric vehicles should emit a warning signal from 2019 onwards [4]. An Acoustic Vehicle Alerting System for stationary condition (AVAS_stat) is permitted, but not obligatory. The purpose of this study is to investigate whether an AVAS_stat can help to prevent accidents.

3 Stationary sound-relevant, safety-critical situations

Interactions between pedestrians and motor vehicles often occur when both are in a traffic area or are intended to enter a traffic area. Regular features of these situations are recurring start and stop motions of all involved traffic participants. Thus, the driving conditions „starting“ and „stopping“ from the perspective of a pedestrian are of great importance. In order to be able to recognize motor vehicles and their driving state, a pedestrian needs sensory-mediated information. However, there is hardly any comprehensive knowledge on the role of auditory information in the perception and behavior of pedestrians in interaction with motor vehicles, in particular the effect of a stationary sound after stopping and before start-up. The aim of this study is therefore to investigate whether an AVAS_stat can contribute to avoiding accidents without exceeding the sound level of conventionally driven vehicles. In a first step of this project, together with blind and visually impaired persons, four safety-critical situations were identified in which the use of a stationary sound could be advantageous (table 1).

No.	Traffic scene	Operating condition	Question	Parameters	Measured Variable
	zebra crossing	stopping	When do you detect the stopping of the vehicle?	With/without stationary sound, driving sound spectrum, stationary sound spectrum, sound level	Reaction time
	zebra crossing	starting	When do you detect the starting of the vehicle?	With/without stationary sound, driving sound spectrum, stationary sound spectrum, sound level	Reaction time
	parking	starting	When do you detect the starting of the vehicle? Which vehicle is starting?	With/without stationary sound, driving sound spectrum, stationary sound spectrum, sound level	Reaction time, Location
	crossing	starting	When do you detect the starting of the vehicle? From which direction is it coming?	With/without stationary sound, driving sound spectrum, stationary sound spectrum, sound level	Reaction time, Location

Tab. 1: Clarification of the studied traffic situations

4 Design of stationary sounds

In the four mentioned situations, in which it is absolutely relevant for pedestrians with visual impairments to auditorily perceive the operating state of a vehicle, different stationary sounds are tested in connection with different driving sounds on their perceptual influence. For these three situations, acoustic recordings were carried out with a Smart ForTwo and processed in such a way that the respective perceivability of the different sounds could be investigated in listening tests in the multimodal laboratory of the TU Dresden using a wave field synthesis system. The transfer function of the sound generator has also been compensated. A sound synthesis framework was created to generate the additional AVAS sounds. In a workshop, the parameters for the driving sound and the stationary sound were determined.

The aim of the sound generation process is to provide two basic sounds, which correspond to the requirements and regulations: The UN-compliant road sound consists of three tonal engine arrangements (similar to those of an internal combustion engine) at 240, 270 and 300Hz. A preliminary test of a sound with fewer motor orders was no longer clearly identifiable as a vehicle. In the

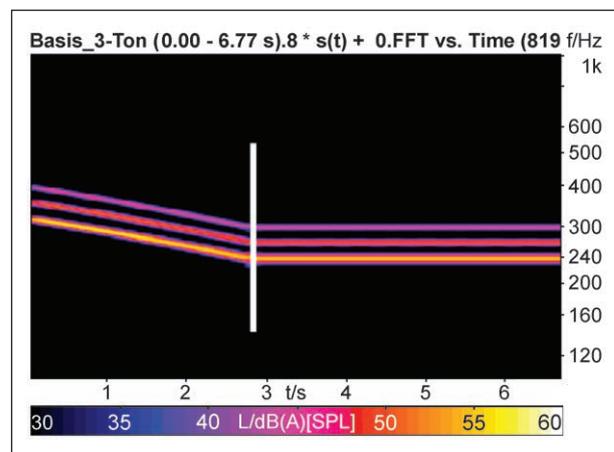


Fig. 1: Basic – driving sound, fft vs. time

case of the use of further motor order, the additional sound would partly lie outside the ideal frequency range of 250 to 500Hz. Since higher motor orders usually have a lower level than lower motor orders, the average motor order has been attenuated by 6dB and the highest motor order by 12dB (see figure 1).

The US-compliant sound consists of the UN-compliant sound and an additional tonal, high-frequency narrowband component around 1kHz. For the stationary sound, the two vehicle sound (UN-compliant driving sound and US-compliant

driving sound) are used as the basis and the following parameters are varied:

- Frequency shift by fractional frequency change: frequency of driving sound is shifted to lower frequencies (always with respect to the center frequency) for stationary sound by a percentage of center frequency
 - no frequency shift (0%),
 - medium frequency shift (50%),
 - large frequency shift (100%).
- Variation of the roughness: by changing the frequency space between the tonal components
 - no roughness change (30Hz → 30Hz frequency spacing),
 - medium roughness change (30Hz → 20Hz frequency spacing),
 - large roughness change (30Hz → 10Hz frequency spacing).
- The speed-dependent frequency change of the driving sound is 3% per km/h,
- level shift (9dB (over Norm, level 1) driving sound → 9dB stationary sound, 9dB → 15dB, 15dB → 15dB (level 2).

All the parameters described here have been combined to form a total of 58 different stimuli.

5 Results of listening tests

5.1 Situation pedestrian crossing

Firstly, the difference in detectability between electric vehicle outside sound without additional stationary sound and with stationary sound was determined for the pedestrian crossing situation (starting and stopping). It is shown that a high level and a large frequency jump lead to significantly better detection times. Thus, in the laboratory, a sound with a jump in level, a frequency jump of 50%, and a change in the roughness to 20Hz was detected on average 0.31s earlier as a sound with the same level but without a stationary sound. The statistical evaluation shows that a higher level is detected significantly earlier, but a level jump is even better than the high level for the detection. Furthermore, it is found that 100% frequency jump is significantly better detectable than no frequency

jump. If the individual combinations are compared with sounds without stationary sounds, it is found that sounds with a frequency jump of 50% or 100% can be detected significantly better in combination with a change in the roughness to 30Hz. In the field test a tendency is shown that this combination allows an earlier detection (0.32 s). In the stopping situation, it can be seen that sounds with a frequency jump of 100% can be detected significantly earlier than sounds with a frequency jump of 50% or 0%. However, it is also shown that all stationary sound combinations except one sound combination (frequency jump 100% with roughness change 30Hz) are detected significantly later than sounds without stationary sound. The vehicle with stationary sound (frequency jump 100% and roughness change 30Hz) was detected on average 0.62s earlier than the vehicle without stationary sound. The same trend is also evident in the US sounds. Here, the sound with stationary sound was detected on average 0.48s earlier.

5.2 Parking situation

In the case of the parking situation, the same results as in the situations before are shown: Higher level or jump in level, higher frequency jump and roughness change to 30Hz are advantageous in the direct comparison with sounds without stationary sound during detection. The UN sound with a jump in the level, a frequency jump of 100% and a change in the roughness to 10Hz could be detected 1.11s earlier than the sound with the corresponding level without stationary sound. In addition to the detection, the subjects in the laboratory study were also asked to detect the vehicles in the respective parking spaces. Here, it is found that the sounds averaged over all parking spaces have no significant differences in the localizability. Also in the field test the tendency is that the UN sounds with frequency jump 100% and roughness change to 30Hz could be detected on average 0.32s earlier than the sounds without stationary sound.

5.3 Crossing situation

The results of the situation intersection show that all sounds with stationary sound are detected significantly earlier than the sounds without stationary sound. This is justified by the fact that in this situation we have a smaller distance between

the test person and the vehicle and thus the transition between stationary sound and driving sound is much more clearly perceived. The greatest significant difference is seen between the detection of the UN sound without stationary sound and the sound level 2, frequency jump 100% and roughness change 10Hz (0.52s).

6 Accident statistics

For safety-critical situations, accident analyses were carried out by the Traffic Accident Research at the TUD GmbH (VUFO), which has a large accident database (GIDAS). In the latest version of GIDAS, no electric vehicles are available in the relevant accident situations. For this reason, a definition was developed that allowed the assignment of cars to groups of different sound levels by existing data such as engine capacity, drive type and year of the model introduction. With the help of this approach, it was possible to determine that the proportion of quieter vehicles in turning accidents was somewhat higher than in the other scenarios. It is possible to estimate how serious pedestrians would be injured if the acoustic emission of electrical drives is reduced and thus the collision speed increased from the derived injury risk function. Because if a conventional vehicle is replaced by an electric vehicle, the driving noise is missing and an equally fast vehicle may appear further away. As a result, there is a risk that a blind person goes on the street in order to cross it. Already existing assistance systems in the vehicles such as parking aids, reversing warning lights and reversing cameras show no reduced accident rate for the situations considered.

7 Summary

A large number of studies in laboratory and practical traffic conditions demonstrate the significantly reduced perceptibility of vehicles with electric drive components. However, the question of whether a stationary sound would improve road safety for visually impaired pedestrians has not yet been addressed. The results of the study show that not every stationary sound in any driving situation leads to a better detection. Some stationary sounds show significant effects with regard to the detection performance, both in normal sighted persons and in

persons with blind/visually impaired vision. In situations where the subject is close to the vehicle, the presence of an additional stationary sound makes sense and leads to an earlier detection. For situations which have a greater distance (for example, zebra crossings or parking space) between the subject and the vehicle, a differentiation of this statement is necessary. Both laboratory tests and field tests have shown that there are stationary sound combinations which enable an earlier detection. Furthermore, an inappropriate stationary sound can also lead to a later detection. It has been found that clear differences e.g. due to level differences or frequency shifts between driving and stationary sound can improve the detection performance.

8 Literature

- [1] R. HANNA: Incidence of Pedestrian and Bicyclist Crashes by Hybrid Electric Passenger Vehicles. National Highway Traffic Safety Administration
- [2] M. L., HASTINGS A., POLLARD J. K., ZUSCHLAG M. & STEARNS GARAY-VEGA: Quieter Cars and the Safety of Blind Pedestrians: Phase 1. National Highway Traffic Safety Administration, 2010
- [3] HASTINGS, A. et al.: Quieter Cars and the Safety of Blind Pedestrians, Phase 2: Development of Potential Specifications for Vehicle Countermeasure Sounds. Dept. of Transportation, 2011
- [4] UNECE: Regulation 138: Uniform provisions concerning the approval of Quiet Road Transport Vehicles with regard to their reduced audibility (QRTV). <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2016/R138e.pdf> (last access: 06.April 2017)

Inhalt

Abkürzungen	10	5.6.3 Fußgängerüberweg – Anfahren (Situation 1)	35
1 Einführung	11	5.6.4 Fußgängerüberweg - Anhalten (Situation 1)	40
2 Stand der Forschung	11	5.6.5 Parkplatz (Situation 2)	44
3 Gesamtziele	12	5.6.6 Kreuzung (Situation 3)	51
4 Methodik des Vorgehens	13	5.6.7 Lästigkeit	58
5 Arbeitspakete	14	5.7 Feldversuch	63
5.1 Konzeption und Planung	14	5.7.1 Versuchsaufbau	63
5.1.1 Potenzieller Einfluss auf die Wahrnehmbarkeit	16	5.7.2 Stimuli	63
5.1.2 Potenzieller Einfluss auf die Erkennbarkeit	16	5.7.3 Probanden	64
5.1.3 Potenzieller Einfluss auf die Ortbarkeit	17	5.7.4 Ergebnisse	64
5.1.4 Potenzieller Einfluss auf die Lästigkeit	18	5.8 Einfluss bestehender Warn- systeme – Kollisionsgeschwin- digkeiten/Verletzungsschwere	65
5.2 Soundsynthese	18	5.8.1 Datenbasis	65
5.2.1 Eingrenzung der Anforderungen an ein Zusatzgeräusch	19	5.8.2 Bestimmung der Unfallszenarien	68
5.2.2 Erstellung des Soundsynthese- frameworks	23	5.8.3 Ausgangs- und Kollisionsgeschwin- digkeiten in Pkw-Fußgänger- Kollisionen	68
5.3 Geräuschaufnahmen	26	5.8.4 Tiefergehende Analysen von Pkw- Fußgänger-Kollisionen	69
5.3.1 Rollgeräusche der sicherheits- kritischen Situationen	26	5.8.5 Besonderheiten von leiseren Fahrzeugen	74
5.3.2 Richtcharakteristik des Soundgenerators	28	5.8.6 Verletzungsrisikofunktion	78
5.3.3 Hintergrundgeräusch	29	5.8.7 Analyse eines GIDAS-Beispielfalles. . .	79
5.4 Geräuschauswahl	30	6 Ergebnisanalyse und Zusammenfassung	80
5.5 Szenengenerierung	31	Literatur	83
5.5.1 Erweiterung der Soundsynthese zur Generierung des Fahrzeug- geräuschs für die virtuellen Szenen . . .	31	Bilder	85
5.5.2 Erstellung der Szenen für das Multimodale Messlabor	34	Tabellen	88
5.6 Hörversuche	34	Anhang	90
5.6.1 Hörlabor – Multimodales Messlabor unter Benutzung der Wellenfeld- synthese	34	1 Situation „Anhalten“	90
5.6.2 Probanden	34	2 Situation „Parkplatz“	90
		3 Situation „Kreuzung“	94
		4 Lästigkeit	107
		5 Abbreviated Injury Scale	111

Abkürzungen

AIS	Abbreviated Injury Scale
FAT	Forschungsvereinigung Automobil- technik e. V.
GIDAS	German In-Depth Accident Study
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration
PS	Pegelstufe
PSp	Pegelsprung
TUD	Technische Universität Dresden
VRF	Verletzungsrisikofunktion
VUFO	Verkehrsunfallforschung an der TU Dresden GmbH
WFS	Wellenfeldsynthese

1 Einführung

Der Mensch ist Verkehrsgeräuschen in vielfältigen Situationen ausgesetzt, da Kraftfahrzeuge in der heutigen Gesellschaft als Transport- und Fortbewegungsmittel unverzichtbar sind. Jedes Fahrzeug weist bestimmte technische Merkmale auf, die maßgeblich für unterschiedliche Qualitäten von Fahrzeugmodellen und -typen sind. Zu ihnen gehören z. B. technisch-mechanische Vorgänge unterschiedlicher Betriebszustände, welche Geräusche verursachen. Diese Geräusche werden insbesondere für Fußgänger hörbar. Das wahrgenommene Geräusch hat somit Informationscharakter: Es weist auf Beschleunigung, Verzögerung und Geschwindigkeit des Fahrzeugs hin. Vor dem Hintergrund des zunehmenden Einsatzes von Elektrofahrzeugen im Straßenverkehr, besteht ein wachsender Bedarf zur Bestimmung der Wahrnehmbarkeit von Fahrzeugaußengeräuschen durch Fußgänger, da sich die Elektrofahrzeuge bis zu einer Geschwindigkeit von 20 km/h nahezu lautlos bewegen. Durch diese geringe Schallabstrahlung entsteht ein erhöhtes Gefahrenpotenzial besonders für schwächere Verkehrsteilnehmer.

Ziel des Projektes war die Erarbeitung von Aussagen über den Einfluss eines künstlich erzeugten Stationär-Geräuschs von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen auf die Sicherheit von schwächeren Verkehrsteilnehmern. Des Weiteren sollte untersucht werden, ob ein Stationär-Geräusch zur Vermeidung von Unfällen beitragen kann und dabei möglichst wenig Lästigkeit besitzt. Dazu werden verschiedene sicherheitsrelevante Verkehrssituationen, verschiedene Stationär-Geräusche und auch Fahrgeräusche herangezogen.

2 Stand der Forschung

Im September 2009 veröffentlichte die NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) einen technischen Bericht über die Häufigkeit von Unfällen von Hybrid- und Elektrofahrzeugen mit Fußgängern und Fahrradfahrern [1]. Die Ergebnisse zeigen, dass Elektrofahrzeuge zwei Mal häufiger als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor an Unfällen mit Fußgängern beteiligt sind, besonders wenn sich das Fahrzeug rückwärts bewegt, verlangsamt oder stoppt, im Verkehr startet sowie bei Parkplatzsituationen. In [2] und [3] führte die NHTSA Detektionsversuche mit zwei Hintergrundgeräuschen und unter-

schiedlichen Fahrzyklen durch und veröffentlichte Konzepte für künstlich erzeugte Fahrzeuggeräusche. Die EU Verordnung 540/2014 fordert für neue Fahrzeugtypen von Elektrofahrzeugen ab dem 1.7.2019 das Vorhandensein eines Warngeräuschs an Elektrofahrzeugen [26]. Die Wirtschaftskommission der UN für Europa harmonisierte ebenfalls das neue Warnsignal in der UN-Regelung 138 [4].

2008 befasste sich KERBER im Rahmen seiner Doktorarbeit mit der Wahrnehmbarkeit von Fahrzeugaußengeräuschen in Hintergrundgeräuschen und entwickelte ein Modell zur Bestimmung der kritischen Abstände der rechtzeitigen Detektion und somit zur Vermeidung von Unfällen [5].

Ebenfalls untersuchten GROSSE et al. 2012 und 2013 die Detektierbarkeit in Hintergrundgeräuschen bei verschiedenen Geschwindigkeiten. Des Weiteren beschäftigten sie sich mit der Anwendung des Gehörmodells von DAU et al. (1996) und zeigten, dass es möglich ist, Erfassungsschwellen vorherzusagen [6], [7].

Auch PARIZET untersuchte 2014 in mehreren Experimenten den Einfluss des Timbres eines Warnsignals auf die Detektierbarkeit. Die Ergebnisse zeigen, dass Amplitudenmodulationen sowohl die Detektion als auch die Lästigkeit erhöhen [8–10].

Am Lehrstuhl für Akustik und Haptik der TU Dresden wurden sowohl Experimente zur Reaktion auf Außengeräusche von Fahrzeugen als auch Experimente zur auditiven Wahrnehmung und Beurteilung von synthetisch generierten Elektrofahrzeuggeräuschen hinsichtlich der Erkennung von Betriebszuständen untersucht [11–13] und [29]. In [11] und [13–16] wurden Reaktionszeitmessungen zur Erkennung von Fahrzeuggeräuschen sowohl mit Sehenden als auch mit Sehbeeinträchtigten und Blinden durchgeführt. Dabei wurden sicherheitsrelevante Situationen untersucht, wie z. B. Parkplatz, Queueentscheidungen und Anhaltesituationen. Unter anderem wurden Mithörschwellen gemessen, um einen Schalldruckpegel zu bestimmen, der ein Fahrzeuggeräusch in einer typischen Verkehrsszene gerade hörbar macht. Aus den Untersuchungen lässt sich ableiten, dass tieffrequente und zeitvariante Signalanteile, wie beispielsweise die Motorordnungen eines Verbrennergeräusches (zwischen 50 Hz und 300 Hz) genügen, um ein Fahrzeug rechtzeitig zu erkennen, vorausgesetzt das Signalspektrum liegt außerhalb des Maskierers. Des Weiteren wurden Reaktionszeitmessungen zur Untersuchung der Betriebszustandserkennung durchgeführt, um den Fre-

quenzbereich für die bestmögliche Erkennung zu finden. Der Versuch wurde sowohl ohne als auch mit einem Hintergrundgeräusch von 55 dB(A) durchgeführt. Die Studie zeigt, dass sich die Erkennung mit der Steilheit des Frequenzanstieges bzw. -abfalles verbessert. Die Frequenzänderung eignet sich gut zur Betriebszustandscodierung. Des Weiteren wurden Studien [27] [28] zum Thema Detektion, Warnwirkung und Lästigkeit durchgeführt. Dabei wurden auch unterschiedliche Geschwindigkeits-Pegel-Skalierungen erzeugt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Änderung der Geschwindigkeitsskalierung die Detektionszeiten der Probanden beeinflusst. Zusätzlich wurden mittels des Einsatzes von künstlichen neuronalen Netzen versucht ein flexibles Modell zu entwickeln, welches die Warnwirkung zukünftiger Elektrofahrzeug-Geräusche vorhersagen kann.

Die Empfehlung eines festen Schalldruckpegels könnte laut YAMAUCHI et al. potenziell problematisch sein und er bevorzugt daher eine adaptive Strategie, um den Pegel des Warntones auf den aktuellen Hintergrund einzustellen [17].

Die Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles (OICA) hat ebenfalls eine Studie zum Acoustic Vehicle Alerting System (AVAS) „Z.E Voice“ im Renault ZOE durchgeführt, die im September 2016 veröffentlicht wurde (Informal Document GRB-64-21¹). In dieser Studie wurden Fahrzeuge (ab Baujahr 2013) in Beachtung der UN-Regelung 138-00 zu 100 % mit AVAS „Z.E Voice“ ausgestattet. Die Geräusche wurden sowohl im Vorwärts- als auch im Rückwärtsgang abgestrahlt. Der Fahrer hatte dabei die Möglichkeit, verschiedene Geräusche (Basic, Glam, Sport) auszuwählen und über einen Pauseschalter das Geräusch bei Bedarf abzuschalten. Sobald das Fahrzeug anfährt, schaltet sich das AVAS automatisch wieder dazu. Keines der verwendeten Geräusche entspricht dem Leerlauf eines Verbrennerfahrzeuges. In dieser Studie wurden insgesamt 300 Nutzer (150 Franzosen, 150 Deutsche) des Renault ZOE zu ihren Erfahrungen mit dem AVAS „Z.E Voice“ befragt. Darunter waren 209 Männer und 91 Frauen (Durchschnittsalter: 52 Jahre). (87 % nutzten den Renault ZOE privat und 13 % geschäftlich.) Die zurückgelegte Fahrstrecke betrug durchschnittlich 4000 km während der Studie (DE 5.400 km, FR 2.600 km). Die Fahrten auf dieser Strecke waren zu 54 % auf der Landstraße, 39 % im Stadt-

verkehr und 6 % auf der Autobahn. Die Nützlichkeit des AVAS schätzten 85 % mit „nützlich“ bis „sehr nützlich“ ein und 12 % mit „kein Zugewinn“ oder „nervig“. Von den Probanden glauben 57 %, dass das Geräusch laut genug ist, um Fußgänger und Radfahrer zu warnen und 30 % sind der Meinung, dass es zu leise ist. Laut Befragung hatten 27 % der französischen und 8 % der deutschen Fahrer gefährliche Situationen mit Fußgängern oder Radfahrern, weil diese das Fahrzeug nicht gehört hatten.

Das Geräusch wird abgeschaltet, wenn das Fahrzeug anhält (an der Ampel, Stoppschild usw.) bzw. sich im Leerlauf befindet. Sobald das Fahrzeug aus dem Stand wieder anfährt, hatten 96 % der Fahrer keine Probleme mit Fußgängern und Radfahrern, die das Fahrzeug nicht bemerkt haben. 7 % der Fahrer hätten gern ein stationäres Geräusch und 92 % halten es nicht für notwendig. Rund ein Viertel der Probanden haben das Zusatzfahrgeräusch zumindest manchmal ausgeschaltet, weil sie das Geräusch als lästig für sich oder ihre Umwelt empfunden haben. Diese Aussage unterstreicht die Wichtigkeit der Betrachtung der Lästigkeit beim Design solch eines Zusatzgeräusches.

3 Gesamtziele

Interaktionen zwischen Fußgänger und Kraftfahrzeugen treten häufig dann auf, wenn sich beide auf einer Verkehrsfläche befinden bzw. beabsichtigen sich auf eine Verkehrsfläche zu begeben. Regelmäßige Merkmale dieser Situationen sind wiederkehrende Bewegungshalte und Bewegungsbeginne aller beteiligten Verkehrsteilnehmer. Für Kraftfahrzeuge gehören beispielsweise verkehrsbedingte Halte mit nachfolgenden Anfahrvorgängen an Knotenpunkten und Querungsstellen sowie Beginn und Ende von Fahrten in und um Anlagen des ruhenden Verkehrs dazu. Fußgänger sind häufig aufgefordert und bestrebt, diese Halte- und Anfahrbewegungen von Fahrzeugen bei ihren eigenen Verhaltensentscheidungen zu berücksichtigen. Somit kommt den Fahrzuständen „Anfahren“ und „Anhalten“ aus Sicht eines Fußgängers eine hohe Bedeutung zu.

Um Kraftfahrzeuge und ihren Fahrzustand erkennen zu können, benötigt ein Fußgänger sensorisch vermittelte Informationen. Über die Rolle der auditiven Information bei Wahrnehmung und Verhalten von Fußgängern in Interaktion mit Kraftfahrzeugen, insbesondere der Wirkung eines stationären Geräusches nach dem Anhalten und vor dem Anfahr-

¹ <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2016/wp29grb/GRB-64-21e.pdf>

ren, bestehen jedoch bislang kaum umfassende Erkenntnisse.

Elektrisch angetriebene Fahrzeuge sollen mithilfe des Acoustic Vehicle Alerting System (AVAS) besser wahrnehmbar sein, ohne das Geräuschniveau von konventionell angetriebenen Fahrzeugen zu überschreiten. Ein künstlich erzeugtes Standgeräusch bzw. Stationär-Geräusch (AVAS_stat) ist dabei erlaubt, jedoch nicht vorgeschrieben. In dieser Studie soll untersucht werden, ob ein AVAS_stat zur Vermeidung von Unfällen beitragen kann. In verschiedenen Verkehrssituationen, in welchen es für Fußgänger mit Seheinschränkungen sicherheitsrelevant ist, den Betriebszustand eines Fahrzeuges auditiv zu erkennen, werden unterschiedliche Stationär-Geräusche in Verbindung mit unterschiedlichen Fahrgeräuschen auf ihren Wahrnehmungseinfluss getestet.

Für Verkehrssituationen im Niedriggeschwindigkeitsbereich, für welche die Stationär-Geräusch-Untersuchung durchgeführt werden sollte, wurden Unfallanalysen erstellt. Dabei wurden die Bewegungen der Beteiligten, die Anprallkonstellationen sowie die tatsächlich aufgetretenen Verletzungen und Verletzungsschweren ausgewertet. Bereits vorhandene Systeme in den Fahrzeugen, wie Einparkhilfen und Rückfahrwarner wurden bei der Analyse gesondert berücksichtigt. Dieser Teil der Studie wurde von der Verkehrsunfallforschung an der TUD GmbH (VUFO) bearbeitet.

4 Methodik des Vorgehens

Die Fragestellung nach der Sinnfälligkeit eines Stationär-Geräusches verlangt zu Beginn die Festlegung von geeigneten Verkehrssituationen. Daraus resultierend müssen alle beteiligten Geräuschkomponenten synthetisch erzeugt oder in Realsituationen aufgenommen werden. So entstand eine Geräuschdatenbank als Basis für die Hörversuche. In Laborhörversuchen wurden die Reaktions- und Ortungsfähigkeit als auch die Lästigkeit von Versuchspersonen auf unterschiedliche Stand- und Fahrgeräusche in den ausgewählten Szenen gemessen. Im Ergebnis entstanden, für eine Großzahl von Fahr-Stand-Geräuschkombinationen, Aussagen über deren Eignung und Zweckmäßigkeit. Ein darauffolgender Workshop mit integriertem Feldversuch mit reduziertem Datensatz diente zur Überprüfung der Ergebnisse in realer Umgebung mit blinden/sehbeeinträchtigten sowie mit normalsehenden Personen. In dem abschließenden Analyse- und Bewertungsteil flossen auch Aussagen über die Bedeutung von vorhandenen Warnsystemen mit ein. Für die gewählten Szenarien wurden Kollisionsgeschwindigkeiten einschließlich der resultierenden Verletzungsschwere angegeben. Die Methodik im Überblick ist in Bild 1 dargestellt.

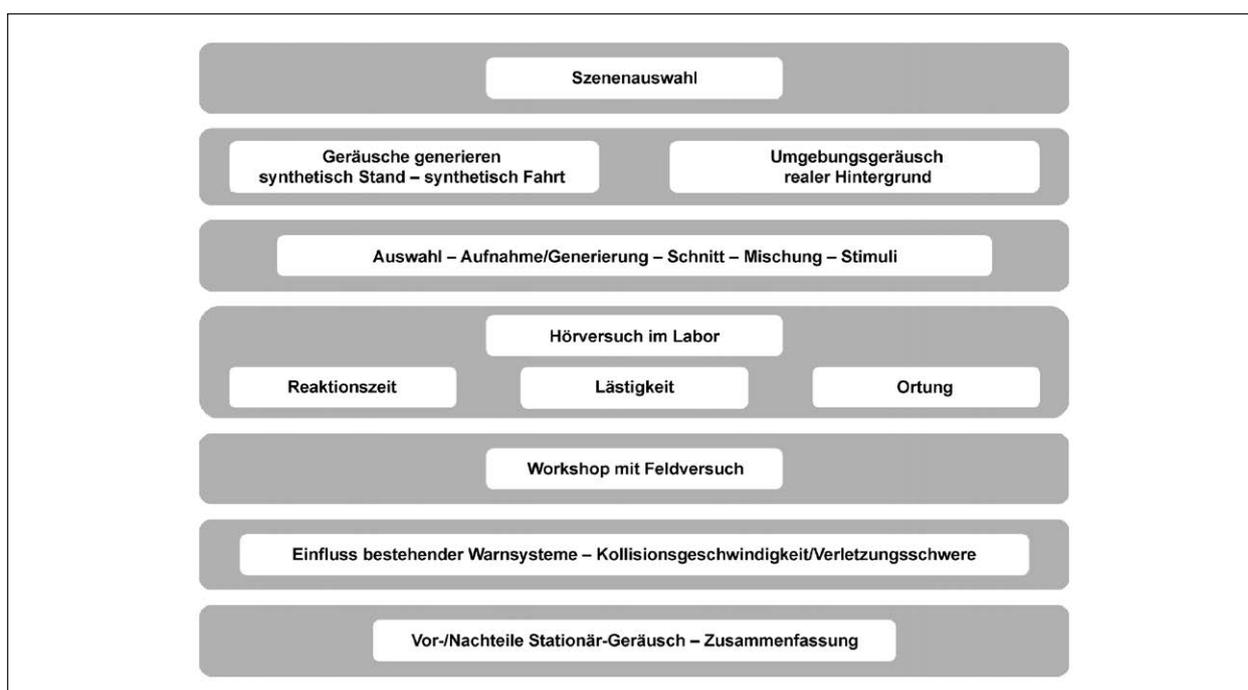


Bild 1: Methodik des Vorgehens

5 Arbeitspakete

Das Projekt analysierte die Fragestellungen, ob künstliche erzeugte Stationär-Geräusche die Sicherheit von schwächeren Verkehrsteilnehmern in sicherheitskritischen Situationen beeinflussen?

1. Welche Eigenschaften muss ein Stationär-Geräusch aufweisen, um eine Erkennbarkeit als Fahrzeug zu ermöglichen?
2. Welche Eigenschaften eines Stationär-Geräuschs unterstützen die Wahrnehmbarkeit aus einem Hintergrundgeräusch heraus?
3. Welche spektralen Eigenschaften eines Stationär-Geräuschs ermöglichen die Ortbarkeit?
4. Inwiefern unterscheidet sich die Reaktion der Probanden bei Vorhandensein oder Fehlen eines Stationär-Geräuschs?
5. Inwiefern unterscheidet sich die Reaktion sehbeeinträchtigter Verkehrsteilnehmer von nicht sehbeeinträchtigten Verkehrsteilnehmern?
6. Wie fällt die Unfallschwere in den untersuchten sicherheitskritischen Situationen aus?

Um diese Fragestellungen beantworten zu können, wurden folgende Arbeitspakete durchgeführt:

1. Konzeption und Planung inklusive Workshop,
2. Soundsynthese: Stationär-Geräusche und Fahrgeräusche,
3. Geräuschaufnahmen: Rollgeräusche für alle Szenen,
4. Szenengenerierung im Multimodalen Messlabor mit Wellenfeldsynthese,
5. Hörversuch im Multimodalen Messlabor,
6. Workshop mit integriertem Feldversuch ausgewählter Szenen,
7. Ergebnisanalyse und Abschlussbericht.

Um das ganze Projekt möglichst ganzheitlich anzugehen wurden zwei Workshops in das Projekt integriert. Im Rahmen der Planung und Konzeption fand der erste Workshop statt, sodass alle Ideen mit den Projektpartner, Teilnehmer der Automobilindustrie, Anwohnern und Blindenverbänden be-

sprochen und diskutiert werden konnten. Einen weiteren Workshop gab es am Ende der Laborversuche, um die Ergebnisse zu besprechen und ausgewählte Situationen im Feld zu erleben.

5.1 Konzeption und Planung

Ziel des ersten Projektteils war die Präzisierung der Verkehrssituationen in Bezug auf örtliche, zeitliche und akustische Merkmale. Dazu wurde das Vorgehen im ersten Schritt in Absprache mit Blinden und Sehbeeinträchtigten aber auch Normalsehenden (Fußgänger) mittels Telefonaten und persönlichen Gesprächen abgestimmt, um alle Problembereiche zu erfassen und so sicherheitskritische Verkehrssituationen definiert. Die Nennungen der Blinden ist zusammengefasst in Bild 2 dargestellt.

Aus diesen Erkenntnissen und nach dem ersten Workshop am 25.11.2016 wurde folgende Präzisierung der zu untersuchenden Verkehrssituationen (örtlich, zeitlich, akustisch) festgelegt, nach denen die Aufnahmen der Geräusche und Hörversuche geplant wurden. Die erste Situation (Bild 3, links/grün) umfasst zwei Teilsituationen, in denen die Fahrzeugbetriebszustände „Anhalten“ und „Anfahren“, wie sie an einem Fußgängerüberweg aufeinander folgen, erkannt werden müssen. Hierbei ist die Reaktion auf die Wahrnehmung des Betriebszustandes (Anhalten, Anfahren) von Interesse. Eine weitere zu untersuchende Situation ist das Anfahren (rückwärts) aus einem Parkplatz (Bild 3, Mitte/blau). Für diese Situation stellen sowohl die Ortung als auch Wahrnehmung die Messgröße dar. In der Situation „Anfahren-abbiegend“ (Bild 3, rechts/pink) wird ebenfalls eine auditive Ortungsleistung – aber über einen größeren Winkelbereich als in der Parkplatzszenen – verlangt.



Bild 2: Überblick über sicherheitskritische Situationen aus Sicht der Blinden/Sehbeeinträchtigten

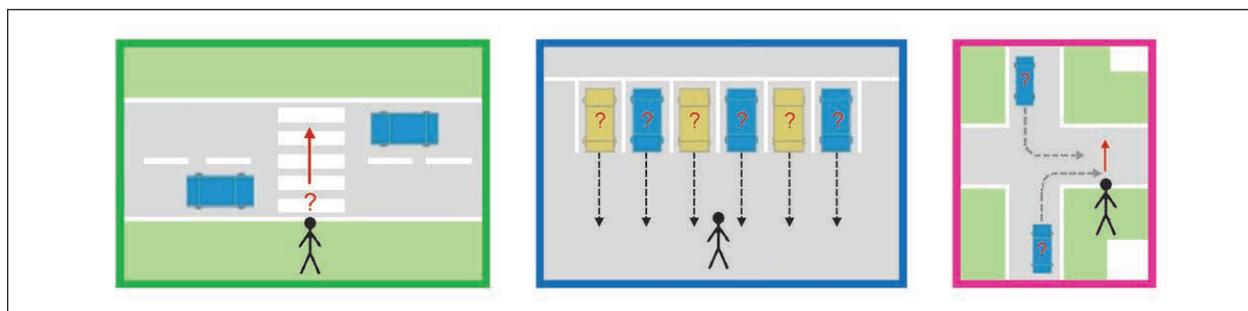


Bild 3: Überblick über die gewählten sicherheitskritischen Situationen

Verkehrsszene	Betriebszustand	Fragestellungen	Stellgrößen	Messgrößen
Fußgänger-überweg	Anhalten	Wann erkennen Sie das Anhalten des herannahenden Fahrzeugs?	mit/ohne Stationär-Geräusch, Fahrgeräuschspektrum, Standgeräuschspektrum, Geräuschpegel	Reaktionszeit
Fußgänger-überweg	Anfahren	Wann erkennen Sie das Anfahren des herannahenden Fahrzeugs?	mit/ohne Stationär-Geräusch, Fahrgeräuschspektrum, Standgeräuschspektrum, Geräuschpegel	Reaktionszeit
Parkplatz	Ausparken	Wann erkennen Sie das Anfahren des Fahrzeugs? Welches Fahrzeug parkt aus?	mit/ohne Stationär-Geräusch, Rückwärtsfahrgeräusch, Standgeräuschspektrum, Geräuschpegel	Reaktionszeit, Ortung
Anfahren-abbiegend	Anfahren	Wann erkennen Sie das Anfahren des Fahrzeugs? Aus welcher Richtung kommt es?	mit/ohne Stationär-Geräusch, Fahrgeräuschspektrum, Standgeräuschspektrum, Geräuschpegel	Reaktionszeit, Ortung

Tab. 1: Präzisierung der zu untersuchenden Verkehrssituationen

Tabelle 1 zeigt die Übersicht über die drei sicherheitskritischen Verkehrssituationen, den jeweiligen zu untersuchenden Betriebszuständen, die Fragestellungen, den Stellgrößen und den jeweiligen Messgrößen.

Die Wahrnehmung von Fahrzeugeinzelgeräuschen wird wesentlich vom Hintergrundgeräusch bestimmt. Das Hintergrundgeräusch nach Pedersen, welches sich durch ein zeitinvariantes Spektrum auszeichnet, wird von einigen Wissenschaftler für Untersuchungen herangezogen. Die fehlende Zeitstruktur bietet den Vorteil, dass zu jedem Zeitpunkt die gleiche Verdeckung vorliegt. Reale urbane Verkehrshintergründe besitzen aber immer eine mehr oder weniger ausgeprägte Zeitstruktur. Die Projektdurchführenden halten ein Hintergrundgeräusch mit einer geringen Zeitstruktur, welches auch im BAST-Projekt-Nr.: 82.0578/2012 [13] Anwendung fand, für zweckmäßig. Im ersten Workshop am 25.11.2016 wurde gemeinschaftlich das TU-Hintergrundgeräusch bevorzugt. In einem früheren Projekt konnte gezeigt werden, dass die Reaktionszeiten mit einem TU-Hintergrund vergleichbare Ergebnisse liefern, wie Reaktionszeiten mit dem Pedersen-Hinter-

grundgeräusch (vgl. BAST-Projekt-Nr.: 82.0578/2012 [13]). Allerdings ist der TU-Hintergrund realistischer durch die geringe Zeitstruktur. Der Einfluss der geringen zeitabhängigen Verdeckungsunterschiede wird durch eine Randomisierung des Szenenstarts im Hörversuch ausgeglichen. Für alle Experimente wird ein Hintergrundpegel von 55 dB(A) empfohlen.

Um die Akzeptanz der Fahr- und Standgeräusche abschätzen zu können, wurde nach den Wahrnehmungsversuchen zur Reaktionszeit und Ortung noch ein Experiment angeschlossen, in dem die Angenehmheit respektive die Lästigkeit der Geräusche bewertet wurde. Aus den Wahrnehmungsversuchen im Labor haben sich einige Unterschiede zwischen den Fahr- und Standgeräusche herauskristallisiert, welche dann durch Präsentation der Originalszenen im Feldversuch auf einer Teststrecke mit Blinden und Sehbeeinträchtigten sowie Normalsehenden verifiziert wurden.

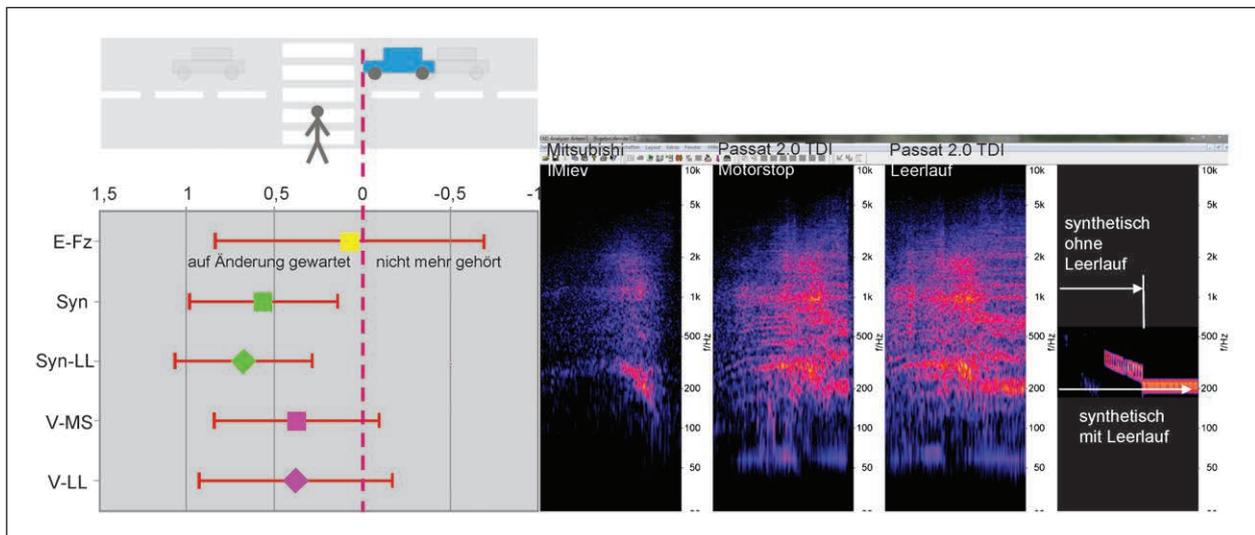


Bild 4: Ergebnisdarstellung der Anhaltesituation aus BAST-Projekt-Nr.: 82.0578/2012 und Spektrogramme der verwendeten Stimuli ohne Hintergrundgeräusch [13]

5.1.1 Potenzieller Einfluss auf die Wahrnehmbarkeit

Ein Teil der Anhaltesituation am Fußgängerüberweg war ebenfalls Gegenstand der Untersuchungen im BAST-Projekt-Nr.: 82.0578/2012 [13]. Dort ging es um die Wahrnehmungsunterscheidung des Anhaltvorgangs zwischen einem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor und einem Elektrofahrzeug. Gemessen wurden Reaktionszeiten nach der auditiven Erkennung des Fahrzeugstillstandes beider Fahrzeuge unter den Bedingungen „Motor aus“ und „Anhalten im Leerlauf“. Für das E-Fahrzeug wurde ein einfaches synthetisch erzeugtes Geräusch verwendet. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind noch einmal in Bild 4 zusammengefasst.

Die Ergebnisse aus dem Projekt (82.0578/2012) [13] zeigen:

- Größere Streuung bei E-Fahrzeug ohne Soundgenerator,
- Kaum Unterschiede mit bzw. ohne Stationär-Geräusch bzgl. Erkennungszeit.
- Ohne klaren spektralen Unterschied zwischen Fahr- und Stationär-Geräusch ist keine bessere Erkennung möglich. Dies gilt sowohl für den Wechsel von einem Fahrgeräusch auf ein nicht vorhandenes Standgeräusch als auch auf ein sich deutlich durch die Klangfarbe vom Fahrgeräusch unterscheidendes Standgeräusch.

Daraus ergab sich für die Geräusche in diesem Projekt folgender Gestaltungsansatz:

Im geplanten Projekt sollten die Sprünge zwischen dem Verzögerungsgeräusch und dem Stationär-Geräusch also in breiteren Grenzen variiert werden. Vermutlich muss sich das Stationär-Geräusch deutlicher vom Fahrgeräusch unterscheiden, um schnell als Betriebszustand „Stand“ wahrgenommen zu werden. Diesbezüglich erscheint auch eine Untersuchung der Lästigkeit des Stationär-Geräuschs angeraten.

5.1.2 Potenzieller Einfluss auf die Erkennbarkeit

Neben dem Frequenz- und Pegelbereich des Zusatzgeräusches muss sichergestellt werden, dass das Zusatzgeräusch auch als Fahrzeug wahrgenommen wird. Darüber hinaus soll aus dem Geräusch erkennbar sein, ob das Fahrzeug beschleunigt oder bremst. Aufgrund der durch den alltäglichen Kontakt mit Verbrennungsmotorfahrzeugen geprägten Erfahrung der Bevölkerung, ist es sinnvoll dabei gewisse charakteristische Eigenschaften des Verbrennungsmotorgeräusches zu übernehmen. Das Geräusch eines beschleunigenden Verbrennungsmotorfahrzeugs ist in Bild 5 zu sehen. Im Spektrogramm (links) sind die mit der Drehzahl ansteigenden, tonalen Motorordnungen deutlich zu erkennen. Solche Motorordnungen verweisen deutlich auf ein Fahrzeug sowie dessen Beschleu-

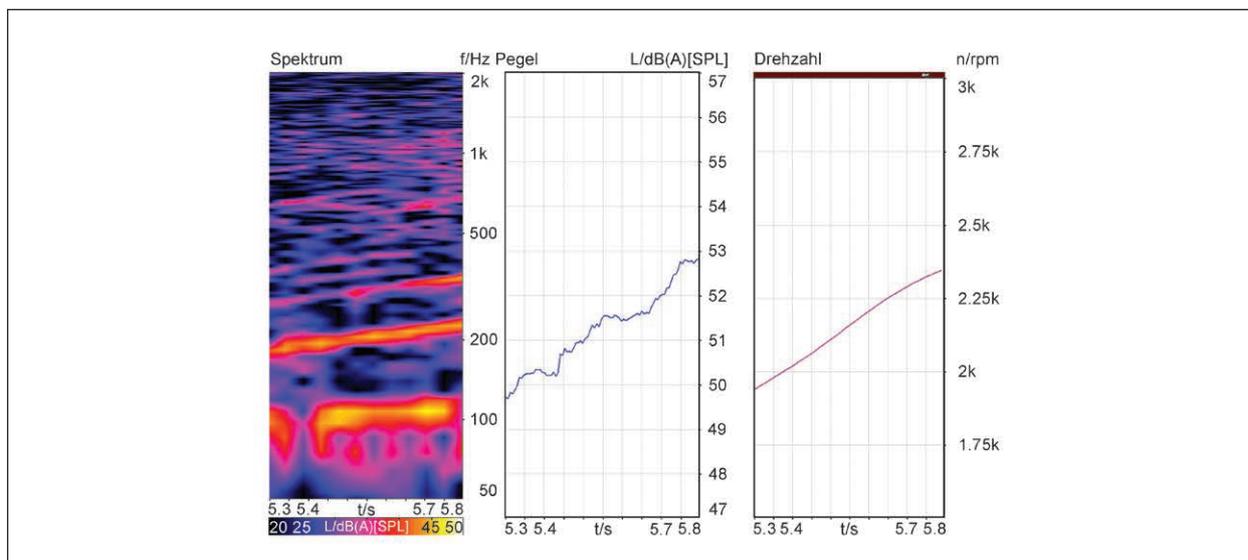


Bild 5: Spektrum, Pegel und Drehzahl über der Zeit eines beschleunigenden Fahrzeugs

nigung hin. Neben der Erhöhung der Mittenfrequenz des Motorgeräusches erhöht sich der Pegel mit der Motordrehzahl. Diese Erhöhung ist jedoch nur schwer von der entfernungsabhängigen Pegelerhöhung des sich nähernden Fahrzeugs abgrenzbar. Daher sollte der Betriebszustand über eine Frequenzänderung des Zusatzgeräusches kommuniziert werden.

Die Detektierbarkeit eines Zusatzgeräusches lässt sich durch Signaleigenschaften wie Lautheit (abhängig vom Signalpegel), Tonalität (abhängig von schmalbandigen Signalanteilen), Rauigkeit (abhängig von einer Modulation des Signals) sowie Schärfe (abhängig von hochfrequenten Signalanteilen) verstärken.

Aus vorhergehenden Untersuchungen zeigt sich, dass charakteristische Geräuscheigenschaften die Erkennung als Fahrzeug ermöglichen.

- Vorhandensein von typischen Geräuschkomponenten von bekannten Verbrennungsmotorfahrzeugen, verbessert die Erkennbarkeit als Fahrzeug.
- Tonale Komponenten (Motorordnungen),
- Frequenzänderung mit Beschleunigung/Verzögerung.

Wird die Gestaltung eines Geräusches möglichst auf nur wenige charakteristische Komponenten beschränkt, bleibt die Möglichkeit spätere Anpassungen für Brandsounds vorzunehmen.

5.1.3 Potenzieller Einfluss auf die Ortbarkeit

Auch zur Ortbarkeit lassen sich aus dem BAST-Projekt-Nr.: 82.0578/2012 [13] Ergebnisse ableiten. Bild 6 zeigt die Ortungsfehler für eine Parkplatzsituation relativ zur Breite einer Parklücke.

Bei der Ortungsgenauigkeit zeigte sich beim Verbrenner keinen Unterschied, ob es ein Leerlaufgeräusch gab oder nicht. Wohl aber beim synthetischen Leerlaufgeräusch, welches zu einer deutlichen Verschlechterung der Ortung führte. Zusammenfassend zeigen sich folgende Ergebnisse:

- Ortung eines breitbandigen Verbrennergeräusches am zuverlässigsten,
- Elektrofahrzeug ohne Soundgenerator schlecht ortbar,
- schmalbandiges zusätzliches Stationärgeräusch scheint nur geringe Verbesserung der Ortbarkeit zu ermöglichen,
- breitbandigere (Zusatz-)Geräusche sind besser ortbar als schmalbandigere Geräusche.

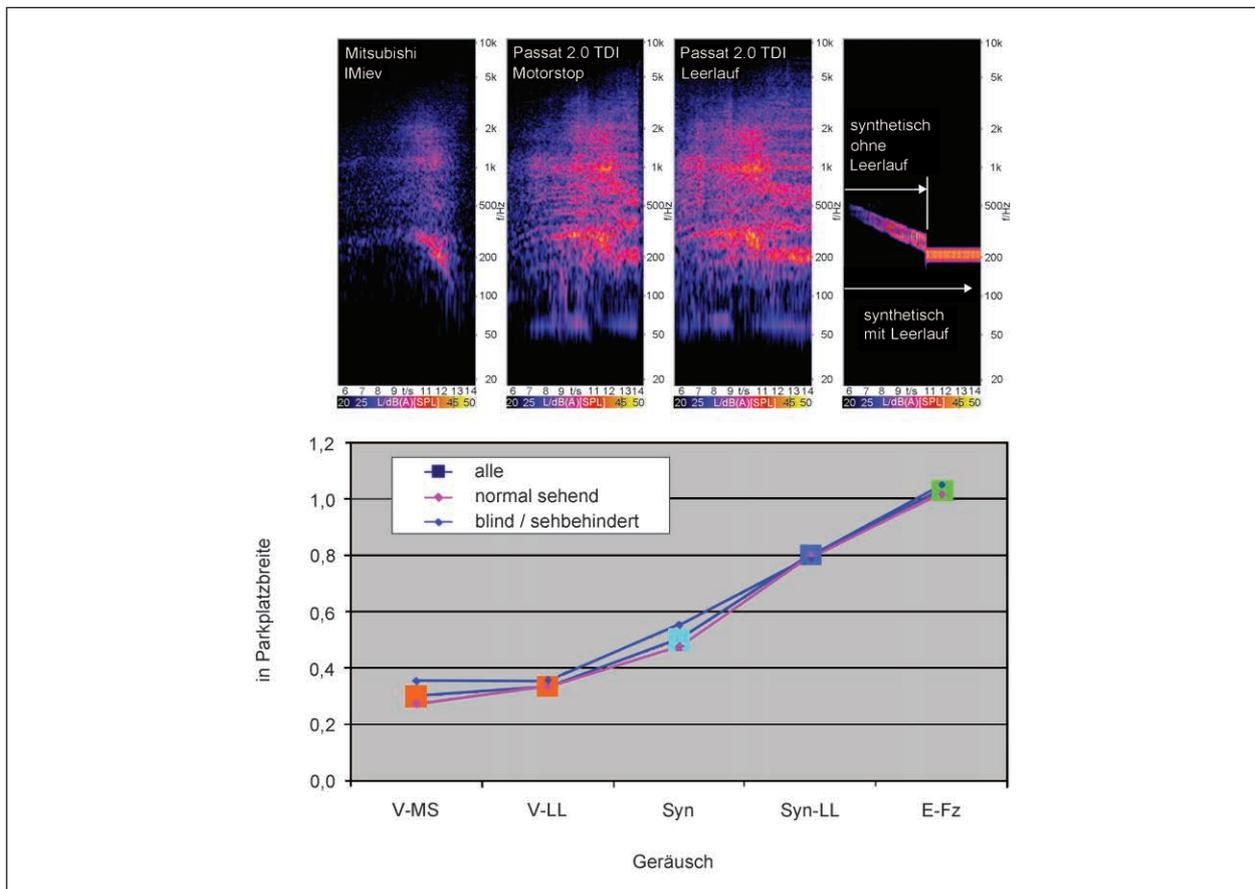


Bild 6: Ortungsfehler für Parksituation relativ zur Breite einer Parklücke

5.1.4 Potenzieller Einfluss auf die Lästigkeit

Die erwähnten Signaleigenschaften (Lautheit, Tonalität, Rauigkeit, Schärfe) beeinflussen jedoch die auditiv wahrgenommene Lästigkeit in starkem Maße. Deshalb muss für die Parameter geschickt ein Kompromiss gefunden werden, der einerseits die Detektierbarkeit in den häufigsten Situationen garantiert aber andererseits Passanten ebenso wie Fahrer keiner unnötigen Geräuschbelastung aussetzt.

Aus den in Stand der Forschung (Kapitel 2) beschriebenen Untersuchungen ergeben sich bezüglich der Lästigkeit folgende Erkenntnisse:

- Große Lästigkeit
 - Amplitudenschwankungen,
 - zeitvariante Signalanteile,
 - Pfeifen und Sirenen.
- Geringe Lästigkeit
 - Shepard Töne,

- Vermeidung von unangenehmen hohen Frequenzen,
- Erhöhung der Anzahl der Harmonischen.

Um ein Geräusch zu gestalten, welches sowohl erkennbar als auch gleichzeitig nicht lästig ist, eignen sich mehrere tieffrequente tonale Signalanteile mit geringer Modulation.

5.2 Soundsynthese

Jedes wahrgenommene Fahrzeuggeräusch hat Verweischarakter: Es kann auf Anwesenheit, Beschleunigung, Verzögerung, Geschwindigkeit oder eine bestimmte Funktion des Fahrzeugs hinweisen. Die Soundsynthese verfolgt das Ziel, Elektrofahrzeuggeräusche sowohl gut wahrnehmbar und ortbar, als auch interpretierbar zu gestalten. Ein Hauptziel des Designs ist die korrekte Übermittlung des Fahrzeugbetriebszustandes. Des Weiteren sollten bei der Soundsynthese verschiedene Übergänge zwischen Stationär-Geräusch und Fahrgeräusch gene-

riert werden. Somit sollten folgende Variablen bei der Synthese berücksichtigt werden:

- Frequenz,
- Frequenzsprung,
- Psychoakustische Parameter (Tonhaltigkeit, Rauigkeit, Schärfe, Schwankungsstärke, Lautheit),
- Pegel.

Die große Vielfalt an Möglichkeiten bei der Erzeugung von konkreten Elektrofahrzeuggeräuschen muss auf einen sinnvollen, untersuchbaren Kern reduziert werden. Die zu erzeugenden Geräusche sollten grundlegenden Charakter haben und zusätzliche herstellerspezifische Erweiterungen im Sinne eines Brandsounds erlauben.

Dieser Satz von Kerngeräuschen, die im Hinblick auf die Lästigkeit und Detektierbarkeit einen optimalen Kompromiss darstellen sollten, wird durch diverse Rahmenbedingungen beschränkt.

5.2.1 Eingrenzung der Anforderungen an ein Zusatzgeräusch

Aus den bisherigen Erkenntnissen aus der Forschung bzw. der UN-Regelung 135 [4] waren nun konkrete Ansätze zur Generierung der Zusatzgeräusche abzuleiten. Dabei musste stets die Wahrnehmbarkeit, die Erkennbarkeit sowie die Lästigkeit beachtet werden.

Frequenzbereich des Zusatzgeräuschs

Für die Gestaltung der Fahrgeräusche und Stationär-Geräusche war es erforderlich, einen geeigneten Frequenzbereich zu wählen. Damit ein Zusatzgeräusch im Hintergrundgeräusch detektierbar ist, musste zunächst das typische, durch andere Fahrzeuge dominierte Hintergrundgeräusch analysiert werden. Beim Blick auf das Leistungsdichtespektrum eines solchen Hintergrundgeräusches (vgl. Bild 7) fällt auf, dass die Energie des Hintergrundgeräusches in den Spektralbereich zwischen 20 und 5.000 Hz fällt. Bei ca. 1.000 Hz ist der Pegel des durch Reifenrollgeräusche dominierten Hintergrundgeräusches am höchsten. Damit das Zusatzgeräusch nicht durch das Hintergrundgeräusch maskiert wird, musste es zumindest in einigen

Spektralbereichen den Pegel des Hintergrundgeräusches übersteigen. Da im Allgemeinen ein erhöhter Pegel mit einer erhöhten Lästigkeit korreliert, war es sinnvoll, das Zusatzgeräusch in einen Spektralbereich zu legen, in dem der Pegel des Hintergrundgeräusches möglichst niedrig ist. Daher sollte das Zusatzgeräusch entweder in einem niedrigeren oder einem höheren Frequenzbereich (relativ zum Maximum des Hintergrundgeräusches bei 1.000 Hz) generiert werden. Die Frequenz eines Tones hängt jedoch mit dem psychoakustischen Maß der Schärfe zusammen, welche wiederum einen großen Einfluss auf die auditiv wahrgenommene Lästigkeit hat. Darum sollte der untere Frequenzbereich bis 500 Hz (siehe Markierung in Bild 7) bevorzugt werden. In diesem Bereich kann der Pegel des detektierbaren Zusatzgeräusches sechs Dezibel geringer als bei 1.000 Hz sein.

Abgesehen von den aus dem Hintergrundgeräusch resultierenden Anforderungen an das Zusatzgeräusch musste natürlich auch die praktische Realisierbarkeit der Abstrahlung durch einen Soundgenerator beachtet werden. Aufgrund der überwiegenden Vorwärtsbewegung ist es sinnvoll, den Soundgenerator im Bereich der Fahrzeugfront zu platzieren. Da im Fahrzeugmotorraum der Platz jedoch begrenzt ist, können nicht beliebige Treibergrößen für den Lautsprecher des Soundgenerators verwendet werden. Die Treibergröße beeinflusst jedoch maßgeblich den im niedrigen Frequenzbereich erreichbaren Pegel. Für den im weiteren Projektverlauf verwendeten Soundgenerator von Delphi ist die Übertragungsfunktion in Bild 8 dargestellt. Es zeigte sich, dass der Pegel unterhalb von 250 Hz deutlich abfällt.

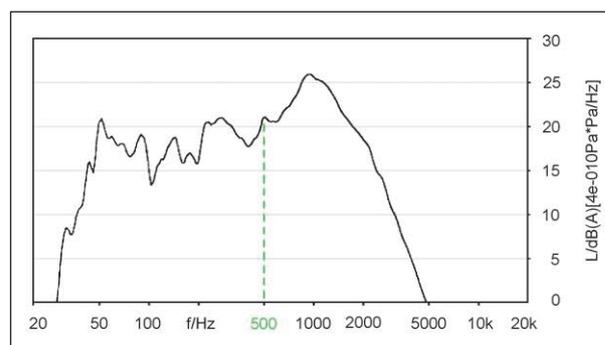


Bild 7: Leistungsdichtespektrum des Hintergrundgeräuschs Bundesstraße 55 dB(A)

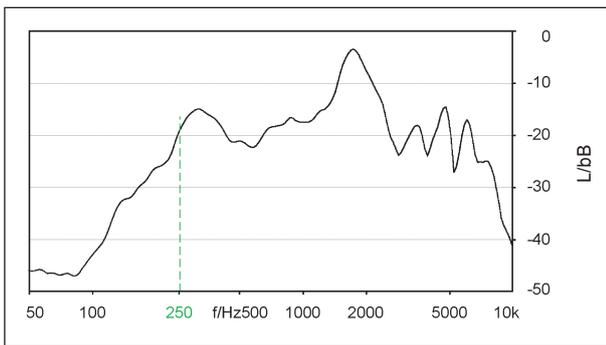


Bild 8: Übertragungsfunktion eines Soundgenerators von Delphi (Gemessen im reflexionsarmen Raum in 2 m Abstand)

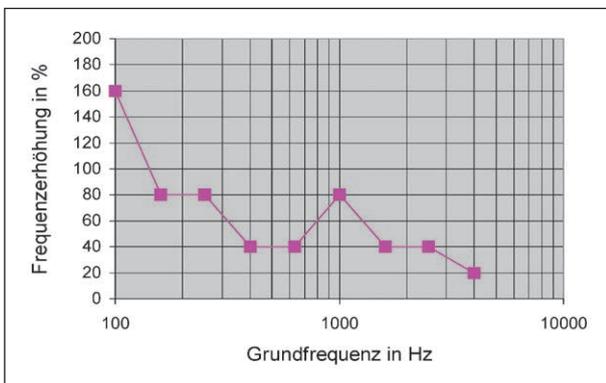


Bild 9: Zur Erkennung des Betriebszustandes in zwei Sekunden notwendige Frequenzerhöhung über der Grundfrequenz (für Aufwärtssweeps)

Geschwindigkeitsabhängige Gestaltung

Auch wenn beim Stillstand des Fahrzeugs keine Geschwindigkeitsänderung erfolgt, ist eine geschwindigkeitsabhängige Geräuschabstrahlung dennoch zumindest indirekt wichtig. So kann die schnelle Erkennbarkeit der Geschwindigkeitsänderung während des Anhalte- bzw. Anfahrvorgangs auch Rückschlüsse über den Beginn bzw. das Ende des Fahrzeugstillstands erlauben.

In [13] wurde untersucht, welche Frequenzänderungen notwendig sind, damit der Betriebszustand (Beschleunigen oder Abbremsen) in einem Zeitraum von zwei Sekunden zuverlässig aus den Hintergrundgeräusch (Bundesstraße 55 dB(A)) erkannt werden kann. Es zeigte sich, dass die notwendige Frequenzänderung abhängig von der Grundfrequenz ist. Der Zusammenhang ist in Bild 9 dargestellt.

Es wird ersichtlich, dass der Frequenzbereich von ca. 300 Hz bis ca. 800 Hz für Sinustöne besonders

geeignet ist, da hier die notwendige Frequenzänderung lediglich rund 20 % pro 2 Sekunden beträgt. Zwar wäre der Bereich über 1.000 Hz theoretisch ebenfalls geeignet, scheidet aber aus den oben dargelegten Akzeptanzgründen bezüglich der Lästigkeit aus. Die UN-Regelung (UNECE R138) [4] sieht eine Frequenzerhöhung von 0,8 % pro Geschwindigkeitserhöhung von 1 km/h vor. Des Weiteren wird gefordert:

- Frequenz des Geräuschs muss geschwindigkeitsabhängig sein,
- Frequenzänderung muss groß genug sein, so dass eine schnelle Betriebszustandserkennung gewährleistet wird.

Zur Erkennung notwendiger Pegel

Der Untersuchungsgegenstand des Projektes beinhaltet auch die Übergänge vom bzw. zum Stationär-Geräusch. Deshalb musste auch der Pegel in Abhängigkeit der Geschwindigkeit festgelegt werden. Damit das Zusatzgeräusch aus dem Hintergrundgeräusch detektierbar ist, muss der Soundgenerator einen gewissen Mindestpegel abstrahlen. Dieser Pegel ist wegen der Entfernungsdämpfung 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 [5] näher erklärt. Der Anhalteweg ($S_{Anhalte}$) berechnet sich über folgende Formel:

$$S_{Anhalte} = S_{Reaktion} + S_{Brems}$$

$$S_{Anhalte} = v_{FZ} \cdot t_{Reaktion} + \frac{v_{FZ}^2}{2 \cdot a_{Brems}}$$

Der Anhalteweg ($S_{Anhalte}$) ist die Summe aus Reaktionsweg ($S_{Reaktion}$) und Bremsweg (S_{Brems}). Der Reaktionsweg berechnet sich aus Fahrzeuggeschwindigkeit sowie Reaktionszeit des Fahrers. Die Reaktionszeit wird nach GREEN [22] für unaufmerksame Fahrer als 1,5 s angenommen. Der Bremsweg ist von der Fahrzeuggeschwindigkeit sowie der Bremsverzögerung abhängig. KERBER nimmt für die Bremsverzögerung 8 m/s² an [5]. Er zeigt, dass die angenommenen 8 m/s² als gute Näherung für

viele Bedingungen (z. B. verschiedene Fahrbahnbeläge und verschieden beladene Autos) gelten. Allerdings schreibt er ebenfalls, dass in der Praxis zum einen viel Bremsweg durch zögerliches Bremsen verschenkt wird, und zum anderen eine Vielzahl zusätzlicher Bedingungen (z. B. Wetterbedingungen) zu einer Verlängerung des Anhalteweges führen können [5].

Abgesehen von der theoretischen Betrachtung wird in der Verordnung EU VO 540/2014 vorgeschrieben, dass ein Geräusch bei Geschwindigkeiten größer 0 km/h bis kleiner gleich 20 km/h von neu typgenehmigten Elektrofahrzeugen ab 2019 abgestrahlt werden soll [26]. Bei den Geschwindigkeiten 10 km/h und 20 km/h sind Minimalpegel festgelegt, die unter Anwendung einer definierten Messvorschrift erreicht werden müssen. Diese Anforderungen sind in Bild 10 dargestellt. Da ab 20 km/h die Rollgeräusche dominieren, ist ein Zusatzgeräusch in höheren Geschwindigkeitsbereichen nicht notwendig und daher in dieser Verordnung auch nicht

vorgesehen. Der Pegel des im Rahmen dieses Projektes zu erzeugenden Zusatzgeräusches orientierte sich eng an diesen Anforderungen, da ein beliebig hoher Pegel aus Akzeptanzgründen unbedingt vermieden werden sollte. Es gibt in der Verordnung keine verpflichtende Anforderung an ein Stationärgeräusch.

Abgesehen von den erwähnten Anforderungen bei 10 km/h und 20 km/h gibt es keine Spezifikation für den Pegel in Abhängigkeit der Geschwindigkeit. Aus der Vorgabe der Verordnung bei 10 km/h und aus dem geschwindigkeitsabhängigen kritischen Abstand nach KERBER [5] (entspricht dem Anhalteweg des Fahrzeugs) kann jedoch die durch den Soundgenerator zu kompensierende Entfernungsdämpfung zur Messposition (entspricht der Passantenposition) für jede Geschwindigkeit abgeleitet werden. Der Vergleich des theoretischen geschwindigkeitsabhängigen Pegelverlaufs an der Position des Probanden zwischen einem herannahenden Fahrzeug (mit konstanter Geschwindigkeit von 10 km/h)

<i>Frequency in Hz</i>		<i>Constant Speed Test paragraph 3.3.2. (10 km/h)</i>	<i>Constant Speed Test paragraph 3.3.2. (20 km/h)</i>	<i>Reversing Test paragraph 3.3.3.</i>
<i>Column 1</i>	<i>Column 2</i>	<i>Column 3</i>	<i>Column 4</i>	<i>Column 5</i>
Overall		50	56	47
1/3rd Octave Bands	160	45	50	X
	200	44	49	
	250	43	48	
	315	44	49	
	400	45	50	
	500	45	50	
	630	46	51	
	800	46	51	
	1,000	46	51	
	1,250	46	51	
	1,600	44	49	
	2,000	42	47	
	2,500	39	44	
	3,150	36	41	
4,000	34	39		
5,000	31	36		

Bild 10: Minimalpegelanforderungen an ein Zusatzgeräusch als Maximalpegel bei Vorbeifahrt an einem Messmikrofon in 2 m Abstand vom Fahrzeugweg

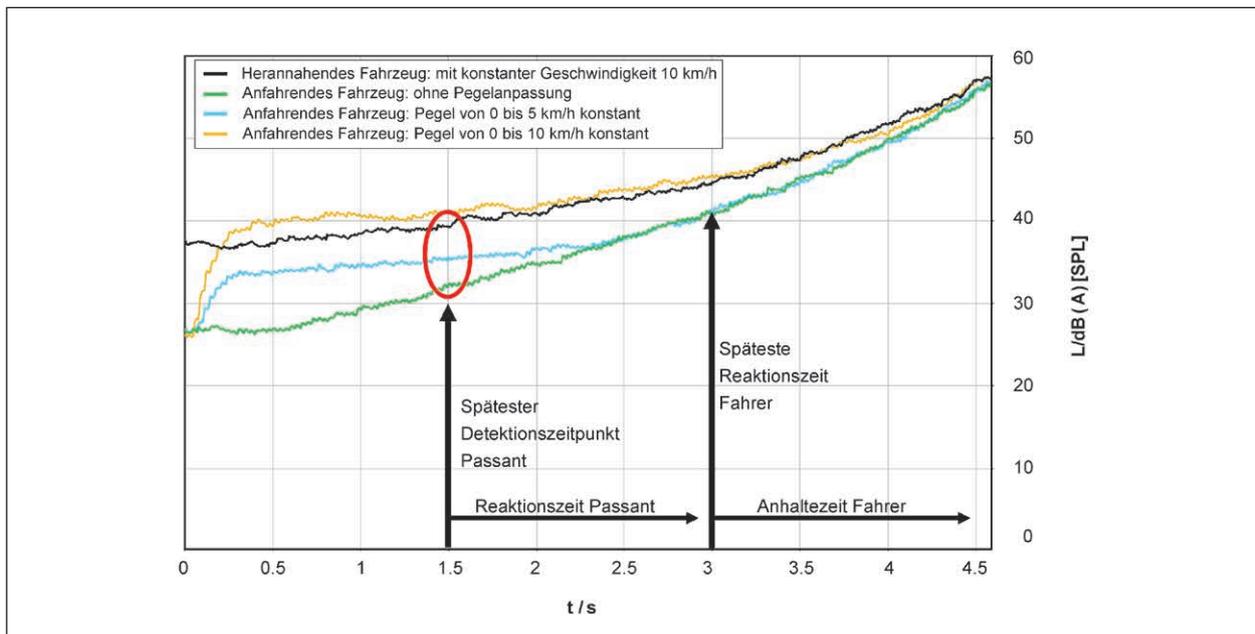


Bild 11: Theoretischer geschwindigkeitsabhängiger Pegelverlauf an der Position des Probanden, den ein von 0 auf 10 km/h anfahrenendes Fahrzeug bzw. ein mit 10 km/h herannahendes Fahrzeug erzeugen würde, wenn sie bei 10 km/h den gleichen Pegel erzeugen [29]

und einem anfahrenenden Fahrzeug (0 bis 10 km/h mit konstanter Beschleunigung von $0,6 \text{ m/s}^2$) mit der beschriebenen Geschwindigkeits-Pegel-Skalierung ist in Bild 11 dargestellt. Eine rechtzeitige Erkennung des anfahrenenden Fahrzeugs ist bei sehr niedrigen Geschwindigkeiten, wie sie beispielsweise bei einer typischen Parkplatzsituation vorkommen, nicht gegeben.

Bei der typischen Parkplatzsituation mit einem Fußgängerabstand von 6,5 m beschleunigt das Fahrzeug aus dem Stand langsam mit $0,6 \text{ m/s}^2$ und erreicht den Passanten nach rund 4,5 Sekunden bei einer Geschwindigkeit von 10 km/h. Der Anhalteweg (Anhaltezeit) ist bei niedrigen Geschwindigkeiten vernachlässigbar klein und ergibt sich somit fast allein durch den Reaktionsweg bzw. die Reaktionszeit des Fahrers. Nach GREEN [22] liegt die mittlere Reaktionszeit eines unkonzentrierten Verkehrsteilnehmers bei 1,5 s. Das bedeutet, dass ein Fahrer ca. 1,5 s zum Reagieren benötigt, um zu Bremsen. Trifft man die gleiche Annahme bezüglich der Reaktionszeit für den Passanten, so müsste er ca. 1,5 s

vor der Querungsentscheidung das Fahrzeug hören können. Dies bedeutet, das Zusatzgeräusch müsste insgesamt ca. 3 s (1,5 s Reaktionszeit Fahrer, 1,5 s Reaktionszeit Passant) bevor das Fahrzeug den Fußgänger erreichen würde, erkannt werden, damit sich der Passant nicht allein auf die Reaktion des Fahrers verlassen muss, um eine mögliche Kollision zu vermeiden.

Daher darf das Fahrzeuggeräusch ab dem Beginn des Reaktionsvorgangs nicht mehr durch das Hintergrundgeräusch maskiert werden. Der Pegel des anfahrenenden Fahrzeugs mit einer konstanten Beschleunigung von $0,6 \text{ m/s}^2$ zum Beginn des Reaktionsvorgangs liegt fast 10 dB unterhalb des Pegels eines herannahenden Fahrzeugs mit konstanter Geschwindigkeit von 10 km/h (vgl. in Bild 11, roter Kreis). Daher wurden zwei weitere Geschwindigkeits-Pegel-Skalierungen betrachtet. Dabei wurde der Pegel des mit konstanter Beschleunigung von $0,6 \text{ m/s}^2$ anfahrenenden Fahrzeugs von 0 bis 5 km/h konstant bei dem Pegel gehalten, welchen das Geräusch bei 5 km/h aufweist (siehe in Bild 11, blaue Linie). Zusätzlich wurde der Pegel von 0 bis 10 km/h konstant bei dem Pegel von 10 km/h gehalten (siehe in Bild 11, gelbe Linie). Bei letzterer Geschwindigkeits-Pegelskalierung würde der Pegel zum Beginn des Reaktionsvorgangs ausreichend hoch sein, sodass eine rechtzeitige Wahrnehmung möglich wäre. Im US-Richtlinienentwurf wird die-

² In diesem Projekt wurde eine konstante Beschleunigung von $0,6 \text{ m/s}^2$ gewählt, weil diese in dem geringen Geschwindigkeitsbereich von 0 bis 10 km/h eine realistische Beschleunigung darstellt.

ser Sachverhalt durch Minimalpegelanforderungen, welche nicht nur für eine Geschwindigkeit sondern für einen Geschwindigkeitsbereich (bspw. von 0 km/h bis 10 km/h) gelten, berücksichtigt.

5.2.2 Erstellung des Soundsyntheseframeworks

Aus den im vorigen Kapitel beschriebenen Anforderungen wurde im Folgenden ein Framework erstellt, welches dynamisch aus der Fahrzeuggeschwindigkeit ein angemessenes Zusatzgeräusch und auch ein Stationär-Geräusch für das AVAS (Acoustic Vehicle Alerting System) generiert. Die schematische Struktur des Systems zur Zusatzgeräuschabstrahlung ist in Bild 12 dargestellt. Da die Open-Source-Software Puredata7 für die dynamische Generierung von Geräuschen bestens geeignet ist, wurde sie für die Implementierung des Systems ausgewählt. Die Software bietet umfangreiche Möglichkeiten der Audiosignalverarbeitung.

Geschwindigkeits-Frequenz-Skalierung

Am Eingang des Soundgenerators liegt die Fahrzeuggeschwindigkeit an, welche zunächst in einen Fahrzeugbetriebszustand übersetzt wird (siehe Bild 13).

Bei einer Geschwindigkeit größer 0 km/h liegt der normale Fahrbetrieb vor. Bei einer Geschwindigkeit gleich 0 km/h steht das Fahrzeug und es wird ein Signal (*standing*) gesendet, wodurch das Fahrzeuggeräusch speziell an die Anforderungen eines Stationär-Geräuschs angepasst werden kann. Bei einer Geschwindigkeit kleiner als 0 km/h fährt

das Fahrzeug rückwärts und es wird ein Signal (*backwd*) gesendet, wodurch das Fahrgeräusch speziell an das Rückwärtsfahren angepasst werden kann.

Nach Erkennung des Fahrzeugmodus, muss die Geschwindigkeit auf eine Grundfrequenz abgebildet werden (Bild 14). Ausgehend von der Anlehnung des Geräuschdesigns an ein Verbrennungsmotorgeräusch wurde die Basisfrequenz (f_{offset}) bei 0 km/h auf 30 Hz festgelegt, da ein durchschnittlicher Vierzylinder-Verbrennungsmotor im Leerlauf mit rund 900 Umdrehungen pro Minute läuft, was 30 Hz entspricht. Die Vielfachen dieser Grundfrequenz entsprechen dabei den Motorordnungen des Verbrennungsmotors. Für jede Geschwindigkeitserhöhung um 1 km/h wird die Frequenz um 1 Hz (rund 3 % pro Hz) erhöht. Die Summe aus Basisfrequenz und geschwindigkeitsabhängiger Frequenzsteigerung wird als Grundfrequenz an das Modul zur Vorwärtsfahrgeräuschgenerierung gesendet (f_{base}).

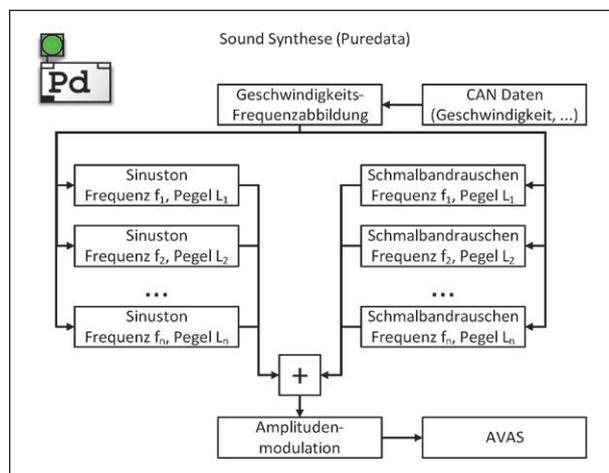


Bild 12: Schematische Struktur des Soundsyntheseframeworks

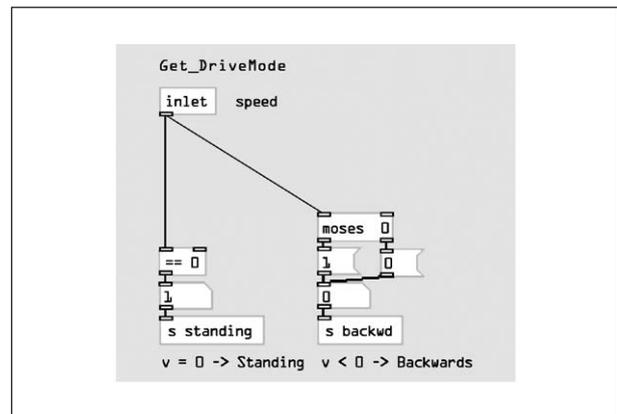


Bild 13: Übersetzung der Fahrgeschwindigkeit in den Fahrzeugmodus (Fahrbetrieb, Stillstand, Rückwärtsfahren)

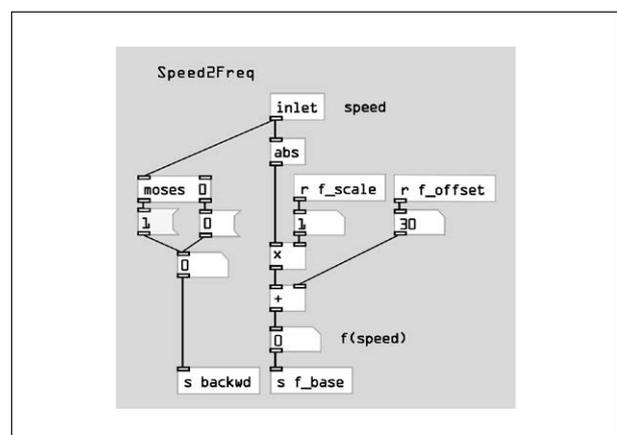


Bild 14: Geschwindigkeits-Frequenz-Skalierung

Geschwindigkeits-Pegel-Skalierung

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, muss der Gesamtpegel der Geräusche geschwindigkeitsabhängig skaliert werden. Dazu wurde ein weiteres Modul in PureData programmiert. Zunächst wird aus der aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeit (v_{FZ}) der Bremsweg ($S_{Anhalte}$) bestimmt, wobei wie oben beschrieben als Reaktionszeit ($t_{Reaktion}$) 1,5 s und als Bremsverzögerung (a_{Brems}) 8 m/s² nach [5] angenommen werden:

$$S_{Anhalte} = v_{FZ} \cdot t_{Reaktion} + \frac{v_{FZ}^2}{2 \cdot a_{Brems}}$$

$$S_{Anhalte} = v_{FZ} \cdot 1,5 \text{ s} + \frac{v_{FZ}^2}{2 \cdot 8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}$$

In der UN-Regelung R138 [4] werden die Minimalpegel als maximaler Vorbeifahrtpegel in zwei Meter Abstand von der Fahrzeugmitte bei 10 und 20 km/h definiert.

Der Soundgenerator ist in der Regel auf der Beifahrerseite verbaut und hat damit einen minimalen Abstand zur Messposition von ca. einem Meter (zwei Meter Fahrzeugmitte) bei der Vorbeifahrt. Daher war es sinnvoll, die in dem Framework angegebenen Geräuschpegel auf einen Abstand zwischen Soundgenerator und Fußgänger von einem Meter bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 10 km/h zu referenzieren ($S_{Referenz}$). Für die Sicherstellung der Wahrnehmbarkeit in der Entfernung des Anhalteweges ($S_{Anhalte}$) musste die Pegelkompensation für die Entfernungsdämpfung zwischen Messposition und Soundgenerator nach folgender Formel berechnet werden:

$$L_{gain} = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{\sqrt{S_{Anhalte}^2 + S_{Referenz}^2}}{S_{Referenz}} \right)$$

Da mit zunehmender Geschwindigkeit das Rollgeräusch stark ansteigt, wurde in Übereinstimmung mit der Regelung ein Geräusch nur bis 20 km/h vorgesehen. Größere Geschwindigkeiten werden jedoch in den für das Stationär-Geräusch interessanten Situationen auch nicht erreicht.

Geräuschgenerierung

Für das Vorwärtsfahrgeräusch kann aus der geschwindigkeitsabhängigen Frequenz (f_{base}) eine variable Anzahl an Sinustönen bei Vielfachen dieser Frequenz generiert werden (Bild 15). Der Pegel dieser Harmonischen ist einstellbar (f0s ... f9s). Analog dazu kann Schmalbandrauschen generiert werden, welches durch Bandpassfilterung (Filter 2. Ordnung mit Güte 4) von Breitbandrauschen erzeugt werden (Bild 17). Die Pegel dieser Schmalbandrauschen sind ebenfalls einstellbar (f0n ... f9n).

Weiterhin kann das Geräusch amplitudenmoduliert werden (vgl. Bild 16), um bspw. die Wahrnehmbar-

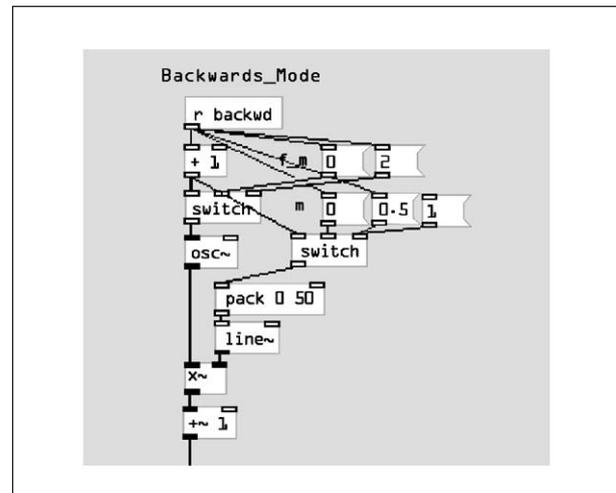


Bild 16: Amplitudenmodulation des Fahrgeräuschs bspw. für den Rückwärtsbetrieb

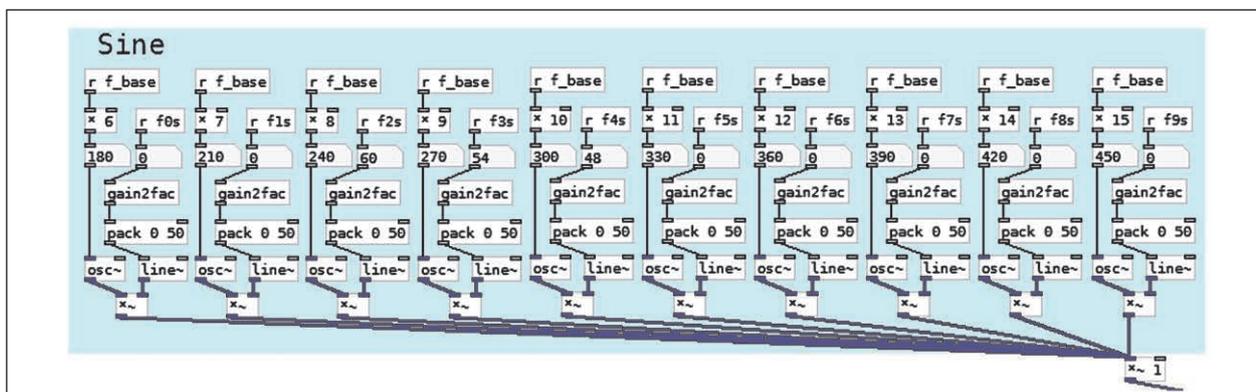


Bild 15: Tonale Komponenten des Fahrgeräuschs

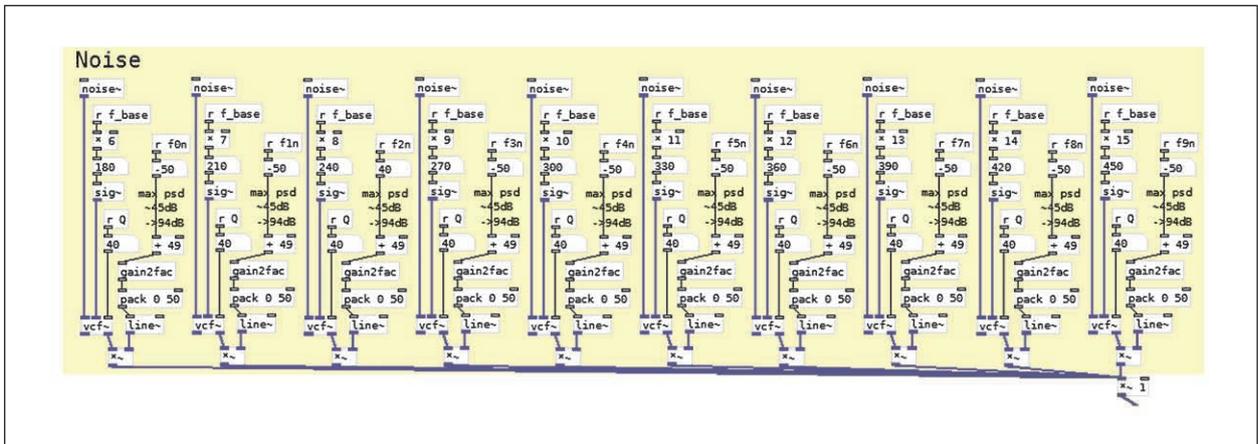


Bild 17: Breitbandige Komponenten des Fahrgeräuschs

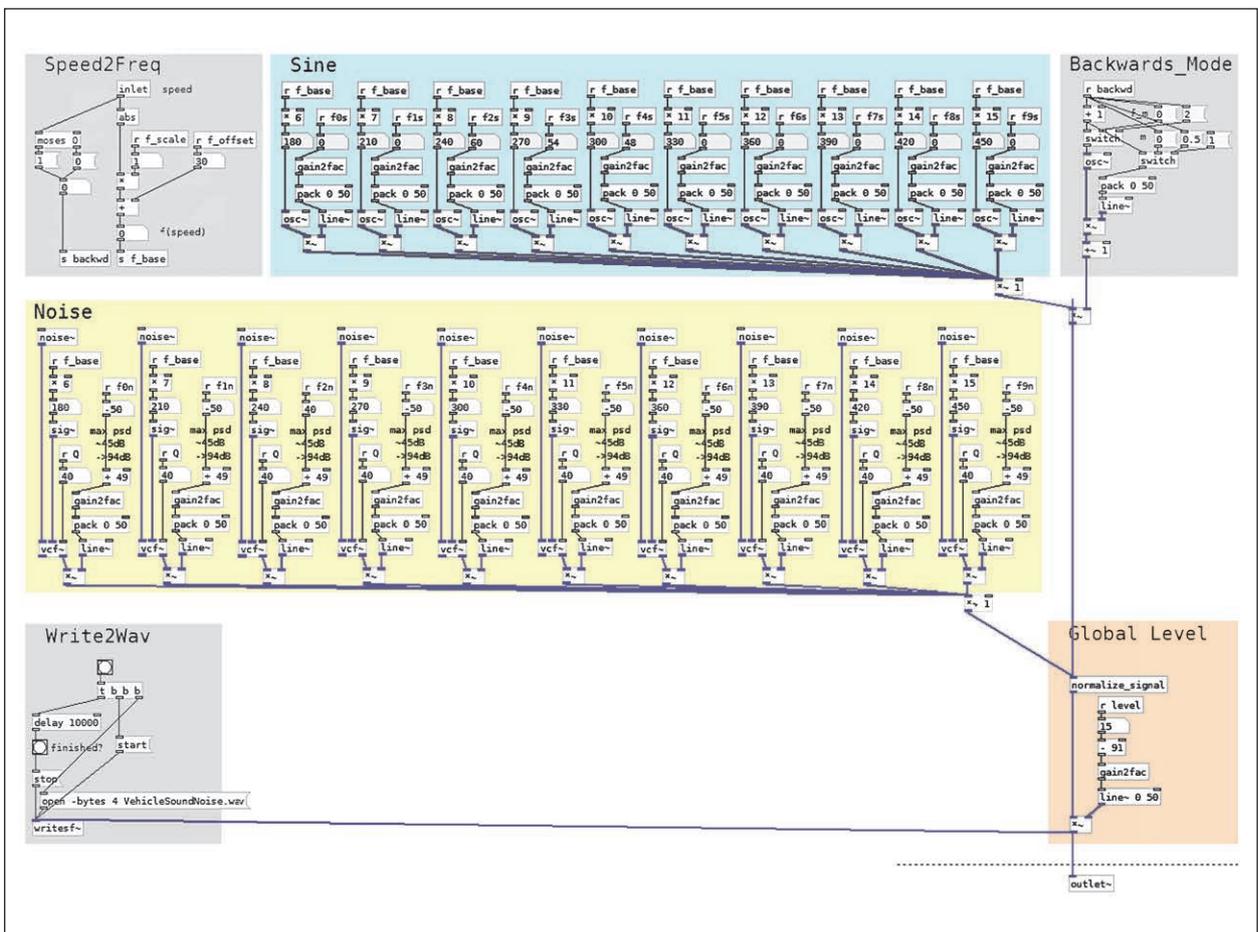


Bild 18: Überblick über das gesamte Framework mit den einzelnen Modulen

keit für Situationen mit besonderem Gefährdungspotenzial (z. B. Rückwärtsfahren) zu verbessern.

Das resultierende Gesamtframework ist in Bild 18 dargestellt. Für die Steuerung der Parameter wurde ein Interface erstellt (Bild 19), welches eine bequeme Bearbeitung der Geräuschparameter sowie ein Speichern und Laden der Parametersätze ermög-

licht. Mit diesem Framework konnten die oben beschriebenen Einflussgrößen der Wahrnehmbarkeit variiert und verschiedene Zusatzgeräuschvarianten erstellt werden.

Es wurden unterschiedliche Elektrofahrzeuggeräusche und Stationär-Geräusche durch die Mitarbeiter des Lehrstuhls Haptik und Akustik erzeugt.

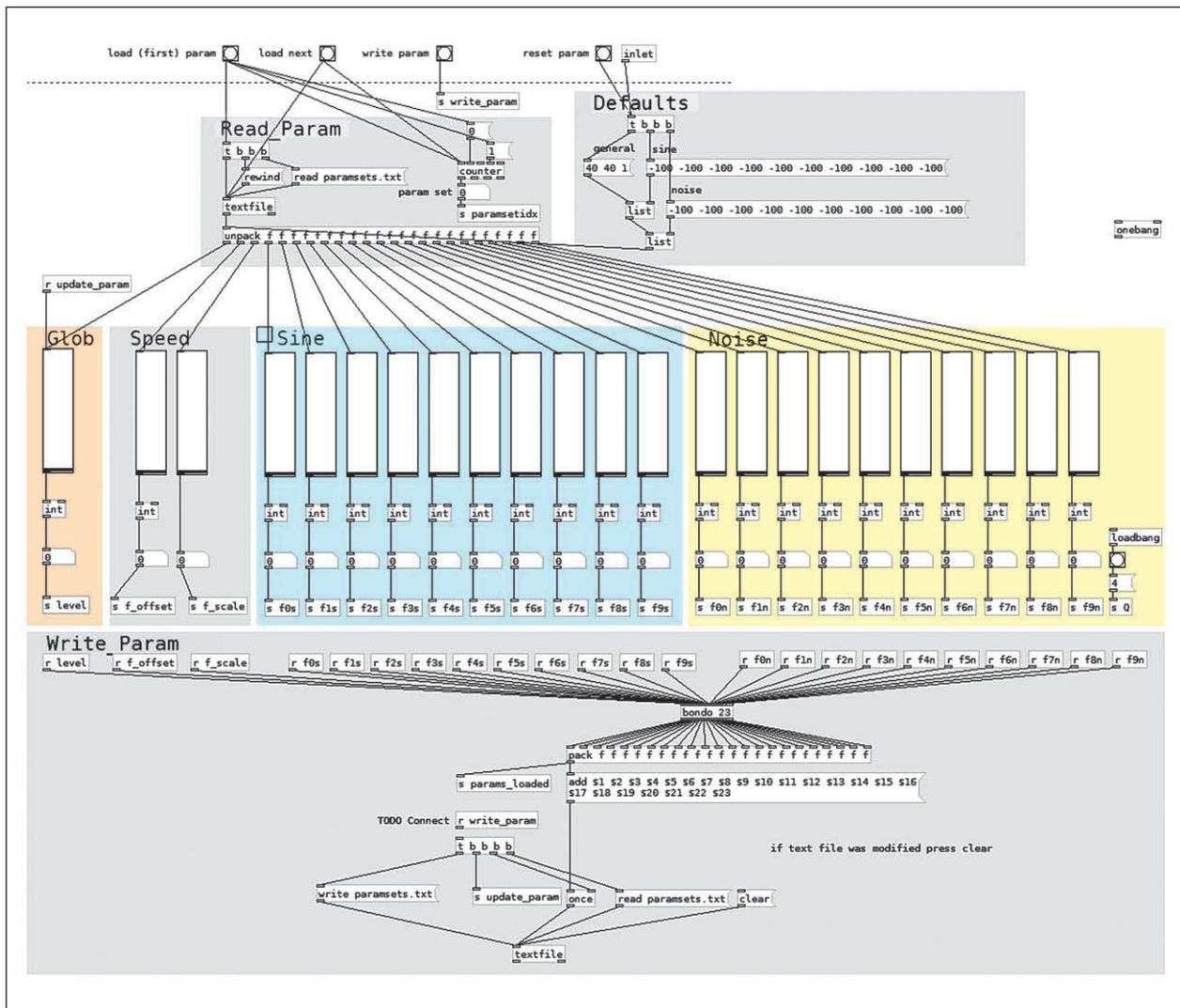


Bild 19: Steuerung der Parameter der Geräuschgenerierung für das Stationär-Geräusch

5.3 Geräuschaufnahmen

5.3.1 Rollgeräusche der sicherheitskritischen Situationen

Zur Außengeräuschaufnahme wurde ein Smart Electric Drive verwendet. Dieser basiert auf dem konventionell angetriebenen Smart der Daimler AG und wurde von der Stadtreinigung Dresden (SRD) für die Aufnahmen zur Verfügung gestellt.

Für jede der in Kapitel 5.1 erwähnten sicherheitskritischen Situationen wurden Aufnahmen angefertigt, um die Rollgeräusche der jeweiligen Situationen für die anschließende Szenengenerierung zu ermitteln. Der Messaufbau ergibt sich aus den entsprechenden Situationen. Da die Szenen für die Hörversuche im Multimodalen Messlabor mittels Wellenfeldsyntheseanlage (WFS) wiedergegeben wurden, wurde für die Aufnahmen ein Messmikro-

fon mit Kugelcharakteristik und nicht, wie für Kopfhörerversuche üblich, ein Kunstkopf, verwendet. Die Mikrofonhöhe betrug bei der Messung 1,6 m. Die Audioaufnahmen entstanden an einem windstillen Tag auf einer trockenen, sauberen Asphaltstraße auf dem Testgelände des Fraunhofer Instituts für Verkehrs- und Infrastruktursysteme (IVI) in Dresden (Bild 20).

Die Sauberkeit der Straße stellte sich als ein wesentliches Kriterium für akzeptable Aufnahmen heraus, da bei niedrigen Fahrzeuggeschwindigkeiten die Geräuscherkennung auf verschmutzter Straße deutlich früher stattfindet als bei sauberem Asphalt. Gleichermäßen wurde darauf geachtet, dass das Reifenprofil möglichst frei von Steinen war. Die Sauberkeit der Straße und der Reifen bei den Geräuschaufnahmen stellen somit die ungünstigsten bzw. leisesten Bedingungen für ein EV/HEV im Geschwindigkeitsbereich bis 20 km/h dar.



Bild 20: Teststrecke auf der die Aufnahmen durchgeführt wurden

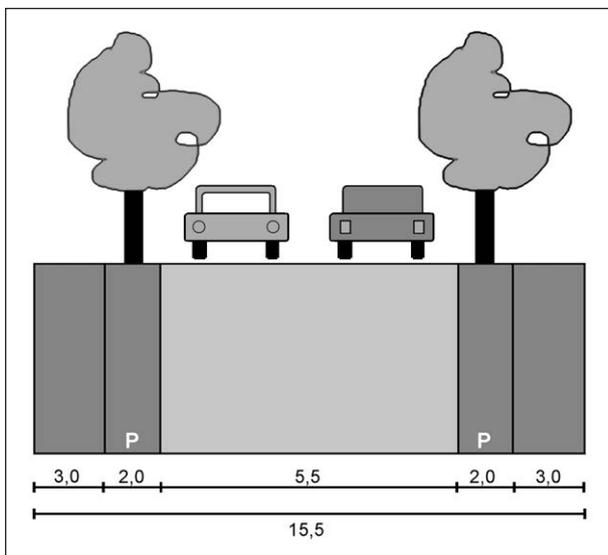


Bild 21: Ausgewählte Entwurfssituation „Quartierstraße“ [20]

Um die drei sicherheitskritischen Verkehrssituation realistisch abzubilden, wurden genaue Maße aus den Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen (RASt) [20] entnommen. Für die Situation 1 und 3 wurde die Entwurfssituation „Quartierstraße“ herangezogen.

Um geeignete Straßenraumbreiten festzulegen, wurde eine Straße ohne ÖPNV und mit möglichen Parkmöglichkeiten gewählt (vgl. Bild 21), in denen der zu untersuchende Geschwindigkeitsbereich realistisch ist.

Für die Situation 1 „Fußgängerüberweg“ wurden zunächst die Betriebszustände (Anhalten, Stand, Anfahren) für beide Straßenseiten aufgenommen (vgl. Bild 22 und Bild 23). Dabei wurde das ½-Zoll Mikrofon jeweils mittig des Zebrastreifens (ca. 1,5 m vom Anhaltepunkt entfernt) und 3,5 m bzw. 6,5 m von der jeweiligen Fahrzeugmitte bzw. Fahrbahn-

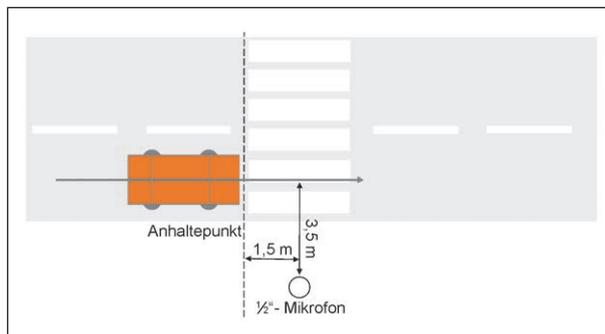


Bild 22: Messaufbau für Situation 1 „Fußgängerüberweg“: zugewandte Straßenseite

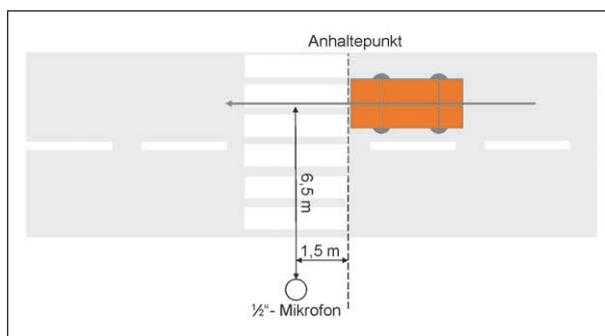


Bild 23: Messaufbau für Situation 1 „Fußgängerüberweg“: abgewandte Straßenseite

mitte positioniert. Dabei wurde ein Zebrastreifen mit einer üblichen Breite von mindestens 3 m als Fußgängerweg angenommen [19].

Anschließend wurden die Aufnahmen für die Situation 2 „Parkplatz“ (vgl. Messaufbau in Bild 24) angefertigt. In dieser Szene steht ein Passant in 6,5 m Abstand frontal vor einer Reihe von sechs parkenden Fahrzeugen. Dafür wurde ein Parkplatz mit einer Länge von 15 m angenommen. Die Breiten der einzelnen Parkplätze betragen jeweils 2,5 m. Die Fahrspuren von den sechs Positionen sind in Bild 24 skizziert.

Die Messaufbauten der Situation 3 „Kreuzung“ sind in Bild 25 und Bild 26 dargestellt. Auch in diesem Messaufbau wurden die Straßenmaße einer Quartierstraße (Bild 21) aus den RAST [20] übernommen. Es wurden zwei Mikrofone jeweils 4,5 m von den jeweiligen Fahrbahnmitten positioniert. Um alle möglichen Situationen abzudecken, wurden Aufnahmen getätigt in denen das Auto sowohl aus der Straße der Mikrofonpositionen kam und anschließend jeweils nach links und nach rechts abbog, als auch aus der gegenüberliegenden Seite anfuhr. Alle Fahrsituationen sind in Bild 25 und Bild 26 aufgezeigt.

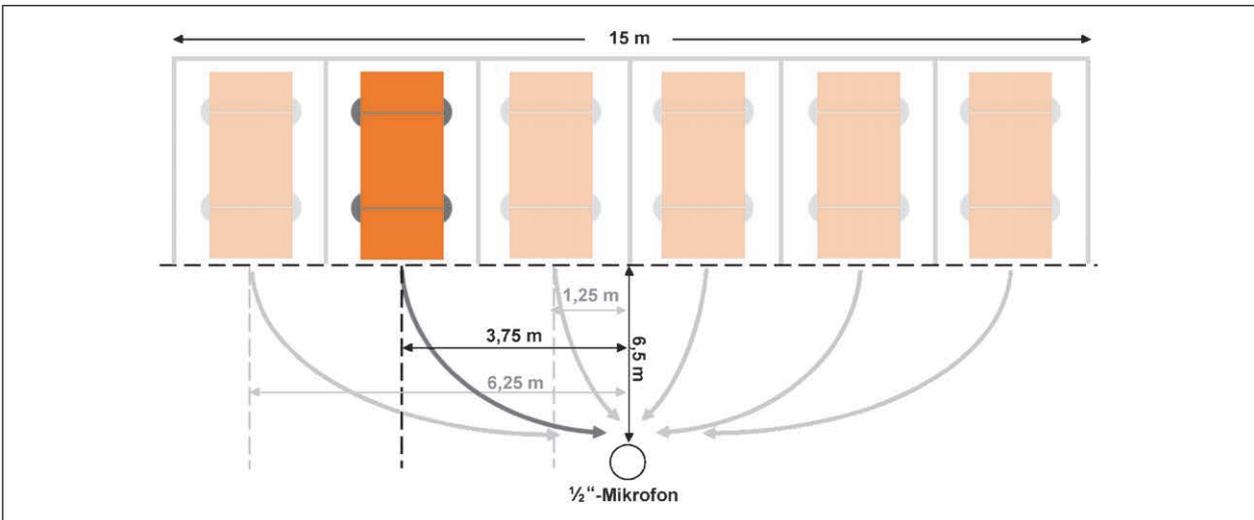


Bild 24: Messaufbau für Situation 2 „Parkplatz“

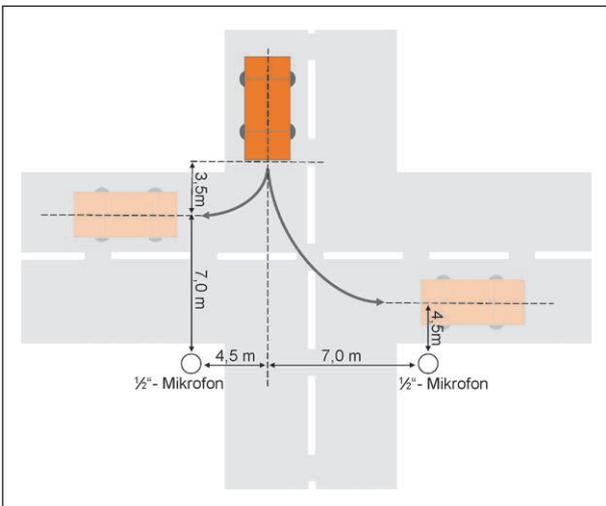


Bild 25: Messaufbau der Situation 3 „Kreuzung“: abbiegendes Fahrzeug aus entgegenkommender Richtung

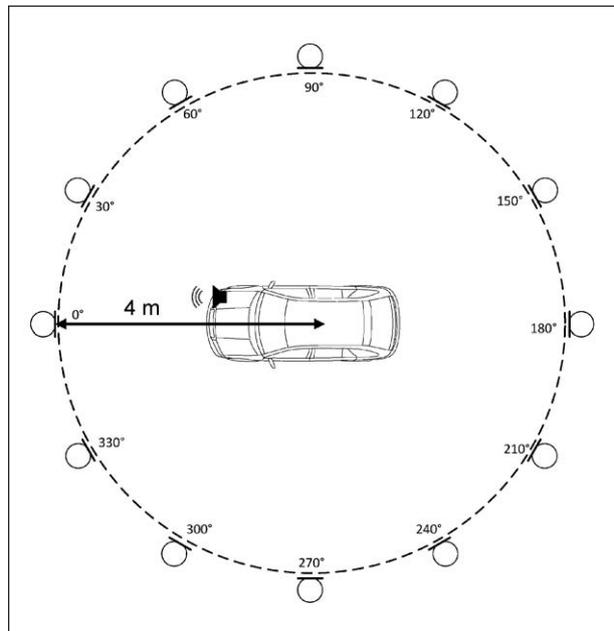


Bild 27: Messung Richtcharakteristik des Soundgenerators im Einbauzustand

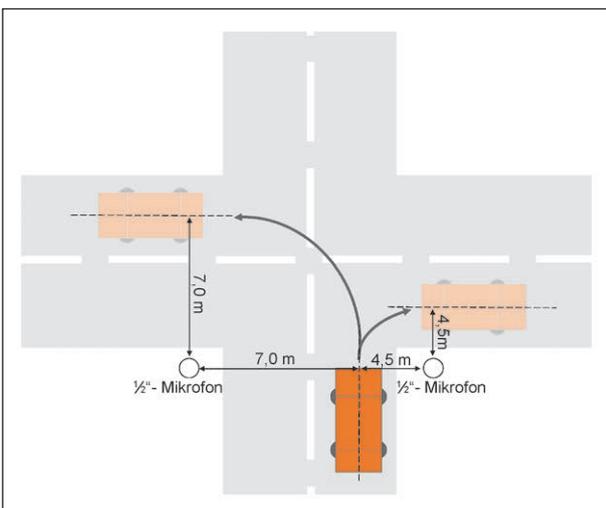


Bild 26: Messaufbau der Situation 3 „Kreuzung“: abbiegendes Fahrzeug aus Blickrichtung des Probanden

5.3.2 Richtcharakteristik des Soundgenerators

Zusätzlich zu den Rollgeräuschen wurde die Richtcharakteristik des AVAS-Systems (hier von Delphi) gemessen. Unter einer Richtcharakteristik wird die Abhängigkeit des Schalldruckes von einem Winkel (bezogen auf die Schallquelle) verstanden (vgl. [21]). Dafür wurde das AVAS-System in einem Elektrofahrzeug (Smart Electric Drive) implementiert. Ein 1/2-Zoll-Mikrofon wurde in einem Abstand von 4 m zur Fahrzeugmitte um das Fahrzeug herum platziert (vgl. Bild 27).

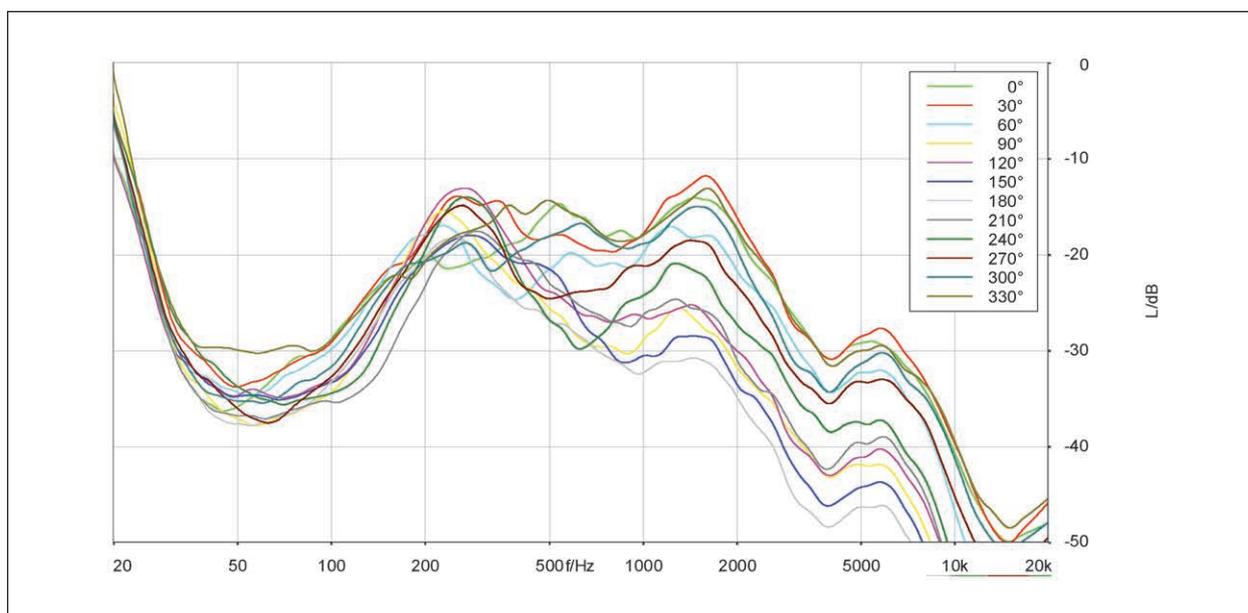


Bild 28: Übertragungsfunktionen des Soundgenerators im Einbauzustand für 12 Winkel in 30°-Abständen (DFT: 131072, 50 %, Han)

Die Messung wurde mit einem logarithmischen Sweep durchgeführt. Der Sweep startete bei einer Frequenz von 20 Hz und endete bei 24.000 Hz. Entsprechend der Anzahl der gemessenen Winkel lassen sich aus den Aufnahmen winkelabhängige Übertragungsfunktionen erstellen. Diese sind in Bild 28 dargestellt. Aus den Messergebnissen geht hervor, dass die Richtcharakteristik der Quelle (hier: Delphi) besonders bei hohen Frequenzen einen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis hat. Für Frequenzen unterhalb von 1.000 Hz (besonders zwischen 200 und 500) weist der Soundgenerator im Einbauzustand nur eine geringe Richtwirkung auf.

Dies bedeutet, dass der Soundgenerator nahezu gleichmäßig in alle Winkelrichtungen abstrahlt. In diesem Frequenzbereich ist die winkelabhängige Abstrahlung vernachlässigbar klein. Oberhalb von 1.000 Hz ist allerdings ersichtlich, dass der Soundgenerator nicht mehr kugelförmig abstrahlt, sondern eine gerichtete Quelle darstellt. Dies bedeutet, dass besonders die Abstrahlung nach hinten (180°) für hohe Frequenzen einen deutlich höheren Pegel benötigt als für vorn (0°).

5.3.3 Hintergrundgeräusch

Ziel für die Generierung der Geräusche waren Wahrnehmungsuntersuchungen von Fahrzeugge-

räuschen mit gleichzeitiger Verdeckung durch ein Hintergrundgeräusch, wie sie in mannigfaltigen Verkehrssituationen auftreten können. Dafür wurden in einem Vorgängerprojekt bereits an sehr unterschiedlichen Orten (an Kreuzungen und Hauptverkehrsstraßen) in der Dresdner Innenstadt akustische Aufnahmen mit einem Kunstkopf und einem ½"-Messmikrofon mit Kugelcharakteristik durchgeführt. Nach dem Abhören durch Experten des Lehrstuhles wurden die Aufnahmen klassifiziert und nach ihrer Eignung für das Forschungsprojekt sortiert. Die Auswahl der Aufnahmen orientierte sich an [13] und [18]. Das Hauptkriterium war die Homogenität der Aufnahme ohne Dominanz von Einzelergebnissen, wie sie bei einer Vorbeifahrt von Lkw, Bussen, Straßenbahnen oder Motorrädern auftreten können. Die Suche nach geeigneten Abschnitten gestaltete sich relativ schwierig. Um die genannten Inhomogenitäten weitgehend auszuschließen, wurden die Hintergrundstimuli aus kurzen Abschnitten zusammen geschnitten, worauf auf die Unhörbarkeit der Übergangsstellen geachtet wurde. Im Ergebnis entstand ein Hintergrund-Stimulus mit einem Mittelungspegel des Schalldruckes von 55 dB(A). In Bild 29 ist exemplarisch das Frequenzspektrum über der Zeit sowie das gemittelte Frequenzspektrum für eine ausgewählte Hintergrundszene dargestellt. Dieses Hintergrundgeräusch wurde in dieser Studie herangezogen.

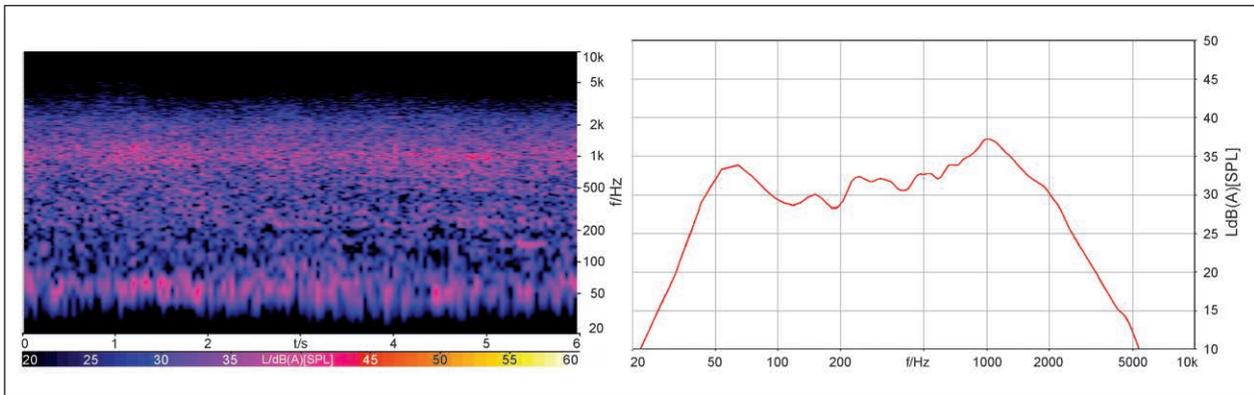


Bild 29: Hintergrundstimulus 55 dB(A); FFT über der Zeit (links) und Mittelungsspektrum (rechts), DTF-Länge 4096

Hintergrundgeräusch	bezeichnet ein Geräusch, welches im Hintergrund zu hören ist. In dieser Situation ist es ein Umweltgeräusch (Bundesstraße, 55 dB(A)) einer Stadt.	
Synthetisches Fahrgeräusch	bezeichnet das Fahrzeugaußengeräusch, welches von einem elektrisch angetriebenen Fahrzeug während des Fahrzyklus ($v > 0$ km/h) abgestrahlt wird und welches auch für Passanten und Bewohnern hörbar ist. Das Fahrgeräusch setzt sich im Wesentlichen aus dem künstlich erzeugten Antriebsgeräusch und dem Reifen-Fahrbahngeräusch zusammen.	
Stationär-Geräusch	Harmonisiertes Stationär-Geräusch	Ein Geräusch, welches den Probanden vorab explizit als Stationär-Geräusch vorgestellt wird.
	Nicht-harmonisiertes Stationär-Geräusch	Stationär-Geräusches, welches den Probanden vorab nicht explizit als Stationär-Geräusch vorgestellt wurde und allein aus dem Geräuschcharakter als solches erkannt werden muss.

Tab. 2: Definition der Geräusch-Begriffe

5.4 Geräuschauswahl

In dem ersten Geräusch-Workshop an der TU Dresden am 25.11.2016 wurden mögliche Fahrgeräusche und Stationär-Geräusche und deren Variationen von den Projektdurchführenden des Lehrstuhl Akustik und Haptik vorgestellt und anschließend mit allen Teilnehmern des Workshops geeignete Fahrgeräusche als auch geeignete Variationen der Stationär-Geräusche für die Hörversuche erarbeitet. Die Tabelle 2 zeigt die Definitionen der verschiedenen Geräuscharten.

Das Ziel, welches bei der Geräuschgenerierung verfolgt wurde, sind zwei allgemeine Grundgeräusche, die den jeweiligen Anforderungen und Verordnungen entsprechen:

- Das UN-konforme Fahrgeräusch (UN-Geräusch) besteht aus drei tonalen Motorordnungen (ähn-

lich denen eines Verbrennungsmotors) bei 240, 270 und 300 Hz. Bei weniger Motorordnungen zeigte sich in einem Vorversuch, dass das Geräusch nicht mehr klar als ein Fahrzeug identifizierbar war. Bei der Verwendung von weiteren Motorordnungen würde das Zusatzgeräusch teilweise außerhalb des idealen Frequenzbereichs von 250 bis 500 Hz liegen. Da höhere Motorordnungen meist einen geringeren Pegel haben als niedrigere Motorordnungen, wurde die mittlere Motorordnung um 6 dB und die höchste Motorordnung um 12 dB bedämpft (vgl. Bild 30).

- Das US-konforme Geräusch (US-Geräusch) besteht aus dem UN-Geräusch und einer zusätzlichen tonalen, hochfrequenten Schmalbandkomponente um 1 kHz.

Für die Stationär-Geräusche werden die zwei Fahrgeräusche (UN-Geräusch und US-Geräusch) je-

weils als Basis herangezogen und folgende Parameter variiert:

- Frequenzsprung durch prozentuale Frequenzänderung: Stationär-Geräusch wird um prozentualen Frequenzabstand des Fahrgeräusch zu tieferen Frequenzen hin verschoben (immer in Bezug auf die mittlere Frequenz),
 - kein Frequenzsprung (0 %),
 - mittlerer Frequenzsprung (50 %),
 - großer Frequenzsprung (100 %).
- Variation der Rauigkeit: durch Veränderung der Frequenzabstände der tonalen Komponenten,
 - keine Rauigkeitsänderung (30 Hz),
 - mittlere Rauigkeitsänderung (20 Hz),
 - viel Rauigkeitsänderung (10 Hz).
- Die geschwindigkeitsabhängige Frequenzänderung des Fahrgeräuschs beträgt 3 % pro km/h.
- Pegelstufen,
 - Pegelstufe 1: Stationär-Geräusch und Fahrgeräusch weisen beide Pegelstufe 1 (Minimalpegel + 9dB) auf,
 - Pegelsprung: Stationär-Geräusch weist die Pegelstufe 1 (Minimalpegel + 9dB) und das Fahrgeräusch Pegelstufe 2 (Minimalpegel + 12dB) auf,
 - Pegelstufe 2: Stationär-Geräusch und Fahrgeräusch weisen beide Pegelstufe 2 (Minimalpegel + 12dB) auf.

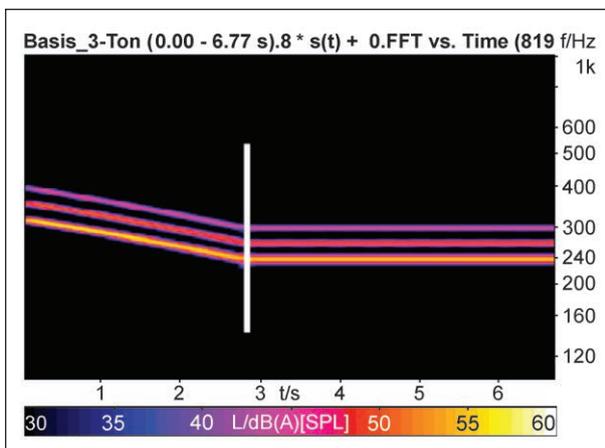


Bild 30: Basis-Fahrgeräusch, FFT über der Zeit

5.5 Szenengenerierung

Aus den in Kapitel 5.4 beschriebenen Geräuschen wurden Szenen für die zu untersuchenden sicherheitskritischen Situationen erstellt, welche sowohl ein Hintergrundgeräusch als auch ein Annäherungsgeräusch beinhalten. Um einen Einfluss der geringfügigen Pegelunterschiede im Hintergrund auszuschließen und um zu verhindern, dass sich die Probanden auf das Einsetzen der Fahrzeuggeräusche einstellen konnten, wurden die Annäherungsgeräusche mit randomisierten Verzögerungszeiten zwischen 2 und 4 s erzeugt.

Um im Folgenden Hörversuche durchführen zu können, mussten die Geräuschaufnahmen für das Wellenfeldsynthesesystem des Multimodalen Messlabors (MMM) aufbereitet werden. Die schematische Vorgehensweise ist in Bild 31 zu sehen. In MATLAB wurde ein Algorithmus implementiert, der nach diesem Schema arbeitet.

5.5.1 Erweiterung der Soundsynthese zur Generierung des Fahrzeuggeräuschs für die virtuellen Szenen

Im Folgenden wird der Algorithmus kurz dargelegt. Im Zuge der Geräuschaufnahmen wurden die Maße der Messsituation bestimmt und die Fahrzeugposition durch eine Videokamera erfasst. Dadurch war es möglich, dem Fahrzeug zu jedem Zeitpunkt der Aufnahme eine Position zuzuordnen. Daraus ließ sich die verändernde Position des sich bewegenden Fahrzeugs nachbilden und die Geschwindigkeit des Fahrzeugs über der Zeit bestimmen.

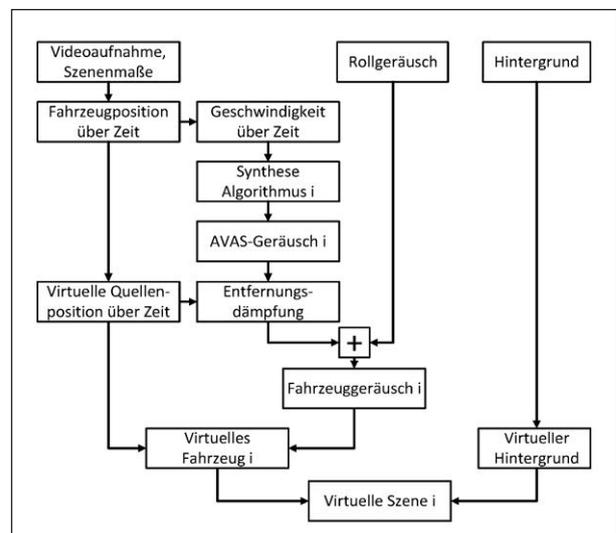


Bild 31: Algorithmus zur Szenengenerierung

Zur Generierung des Fahrzeuggeräuschs der virtuellen Szenen wurden für jede Szene die Fahrzeugkoordinaten über der Zeit berechnet. Mithilfe der Fahrzeugposition konnte zeitabhängig das Fahrzeuggeräusch bedämpft werden, sodass der korrekte Pegel an der Position des Passanten generiert wurde. Die Geschwindigkeit ist Ausgangsgröße des Szenengenerators und gleichzeitig die Eingangsgröße für die unterschiedlichen Geräuschsynthesealgorithmen die in der Soundsynthese erstellt wurden. Damit wurden die synthetischen Zusatzgeräusche für das sich bewegende Fahrzeug generiert. Das resultierende Fahrzeuggeräusch sowie die Positionsdaten wurden zur Verwendung im WFS-System exportiert.

Das Fahrzeug fuhr mit maximaler Geschwindigkeit (v_{max}) an den virtuellen Zebrastreifen heran und verzögerte mit konstanter Verzögerung von $0,6 \text{ m/s}^2$, sodass das Fahrzeug vor dem Zebrastreifen zum Stehen kam. Diese Stillstandposition war Ausgangssituation für die Anfahrtsituation. Hier beschleunigte das Fahrzeug mit konstanter Beschleunigung ($a = 0,6 \text{ m/s}^2$) bis zur maximalen Geschwindigkeit (vgl. Bild 32).

Generierung der Geräusche für die Parkplatzsituation

Die Maße für die Generierung der Geräusche für die Parkplatzsituation sind in Bild 34 gezeigt. Dafür wurden sowohl die Abstände der Parklücken zueinander aufgezeigt, als auch der Abstand des Messmikrofons bzw. des Passanten zum Beginn der Parklücke. Des Weiteren wurden die jeweiligen Wendekreise der ausparkenden Fahrzeuge, also auch des Soundgenerators berechnet.

Für die Berechnung der Fahrzeugdaten mussten im Algorithmus sowohl die Geradeausfahrten als auch das Abbiegeverhalten entsprechend der berechneten Wendekreise berücksichtigt werden.

Generierung der Geräusche für die Kreuzungssituation

Für die Kreuzungssituation wurden alle Maße entsprechend Bild 35 aufgenommen. Dabei starteten die Fahrzeuge entsprechend der ausgewählten Uhrzeitpositionen. Alle Fahrzeuge befanden sich beim Stillstand in einem Abstand von insgesamt $4,5 \text{ m}$ vom Passanten entfernt. Die Berechnung der Koordinaten für die jeweilige Fahrzeugposition fand ebenfalls mittels eines eigenen Algorithmus statt.

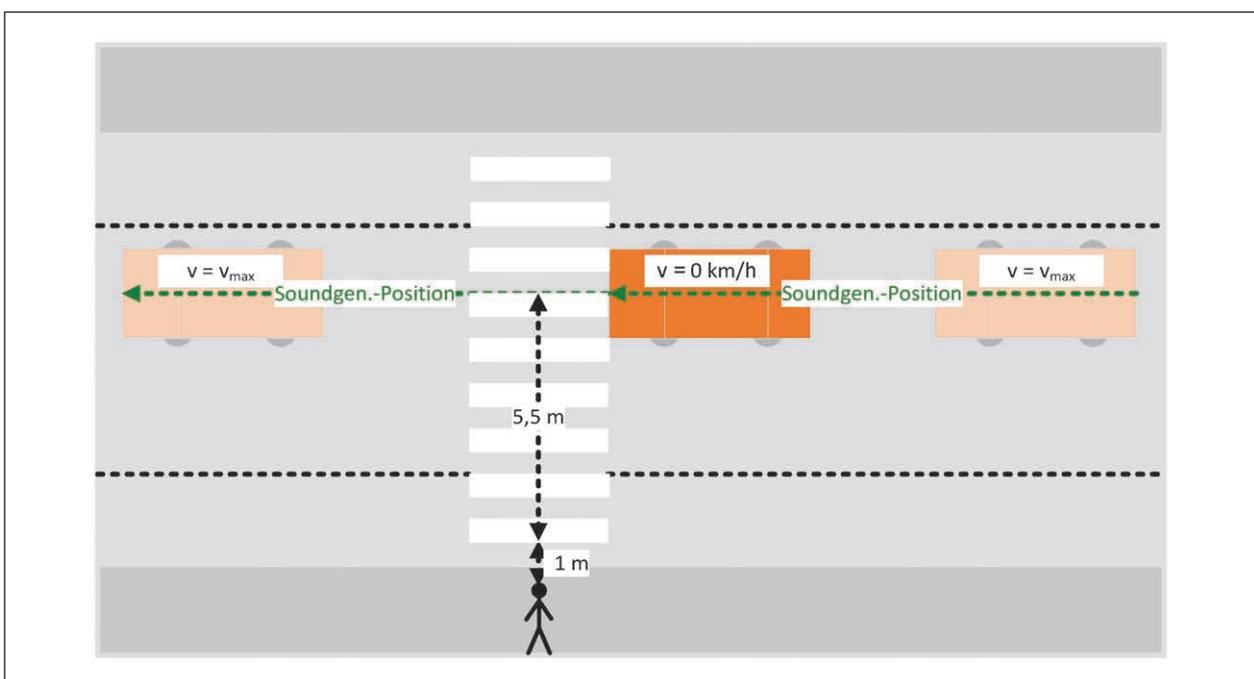


Bild 32: Maße der Übergangssituation von Situation 1

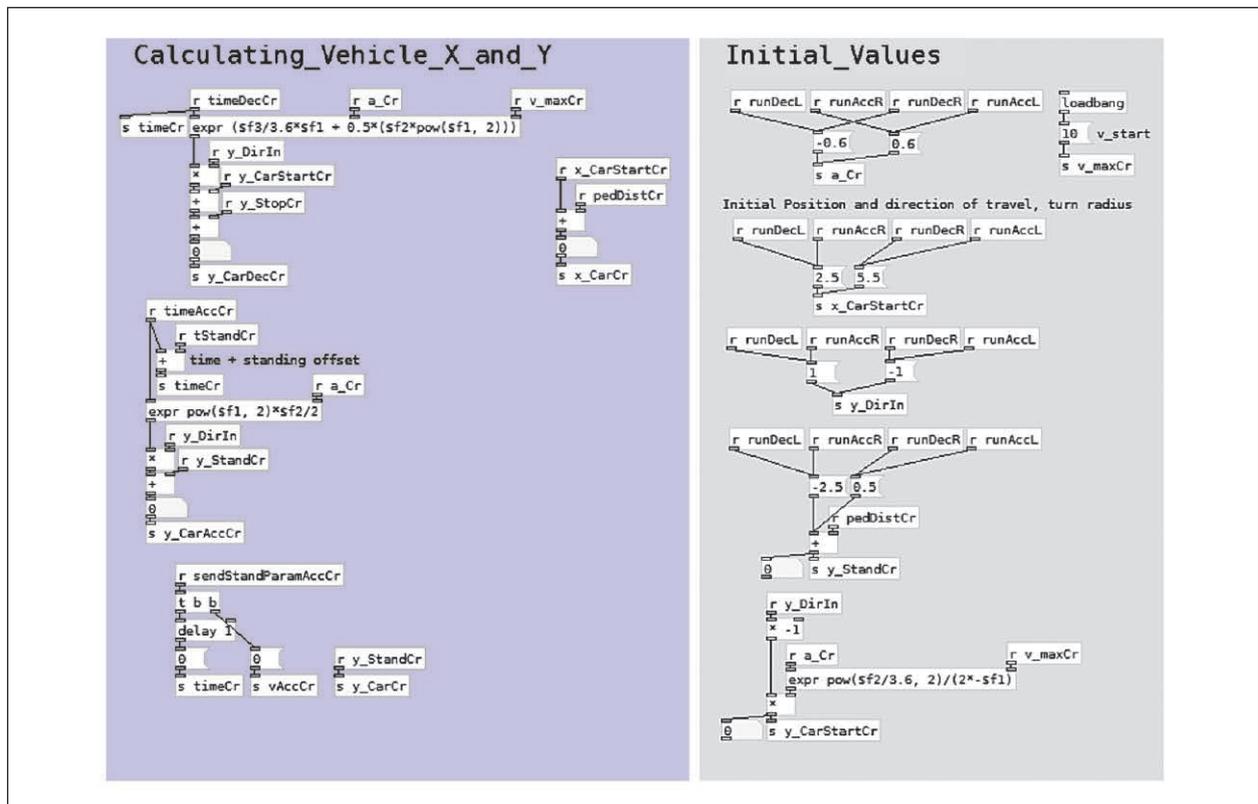


Bild 33: Algorithmus zur Generierung der Positionsdaten für die Situation 1

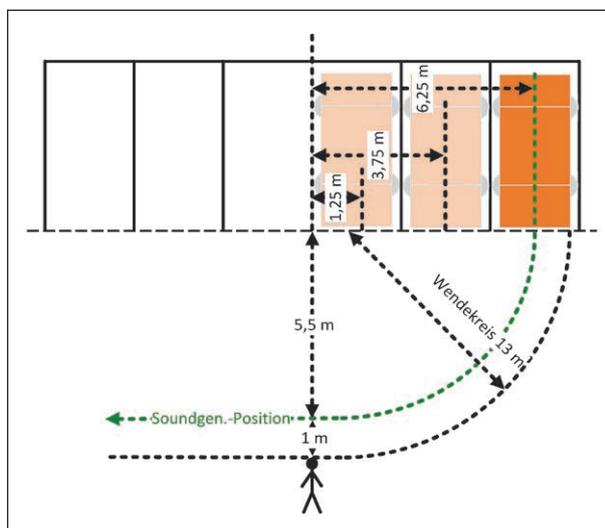


Bild 34: Maße der Parkplatzsituation

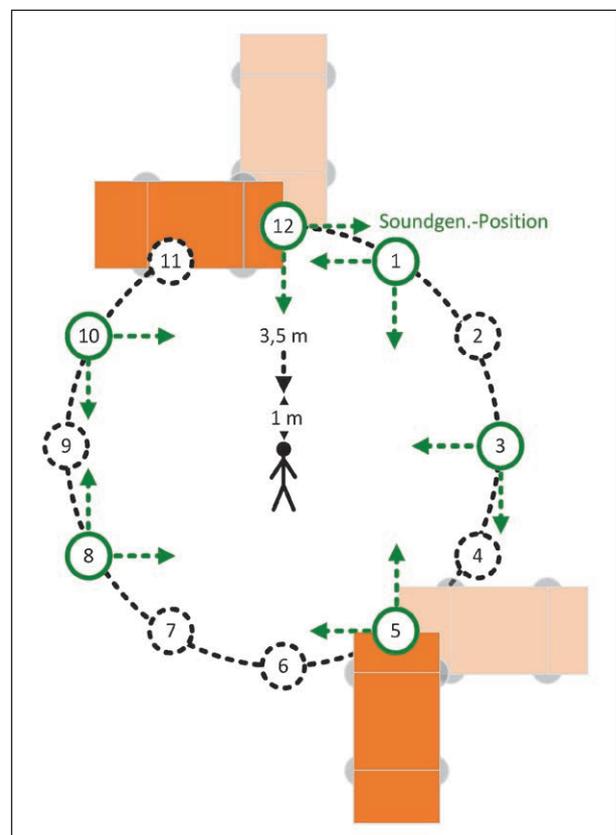


Bild 35: Maße der Kreuzungssituation

5.5.2 Erstellung der Szenen für das Multimodale Messlabor

Schließlich wurden die veränderlichen Zusatzgeräusche mit den in Kapitel 5.3 aufgenommenen Reifenrollgeräuschen überlagert und ergaben so das Gesamtfahrzeuggeräusch. Die exportierten Positionsdaten wurden nur verwendet, um die virtuellen Schallquellen zu erzeugen, die das Fahrzeug in der virtuellen Umgebung repräsentierten. Zusammen mit dem Hintergrundgeräusch, welches aufgrund der großen Distanz der Quelle zum Passanten als ebene Welle dargeboten wurde, ergab sich am Ende für jedes Zusatzgeräusch eine virtuelle Verkehrsszene.

5.6 Hörversuche

5.6.1 Hörlabor – Multimodales Messlabor unter Benutzung der Wellenfeldsynthese

Die Hörversuche wurden im Multimodalen Messlabor (MMM) durchgeführt. Das MMM umfasst eine Fläche von 4 m Breite x 6 m Länge und ist umlaufend mit 468 Lautsprechern ausgestattet. Die Anlage wurde benutzt, um das 55 dB(A)-Hintergrundgeräusch sowie die erforderlichen Fahrzeuggeräuschquellen darzubieten. Das Hintergrundgeräusch wurde allseitig als ebene Wellen abgestrahlt, wodurch sich die Versuchspersonen auditiv in eine

Verkehrsszene hineinversetzt fühlten, ohne dass das Hintergrundgeräusch ortbar war. Das ist sinnvoll, da in den Experimenten auch die Ortbarkeit von Einzelfahrzeuggeräuschen ermittelt werden sollte.

5.6.2 Probanden

Insgesamt wurden für die Hörversuche 41 Versuchspersonen rekrutiert. Davon waren 21 normalsehend und 20 blind bzw. sehbeeinträchtigt. Des Weiteren war das Geschlecht der Versuchspersonen nahezu gleichverteilt (19 Frauen, 22 Männer) und die Altersspanne umfasste 20 bis 70 Jahre. Hörschädigungen wurden als Dropouts aus der Studie ausgeschlossen. Die mittlere Ruhehörschwelle aller Probanden ist in Bild 36 gezeigt.

Die Probanden wurden in zwei Gruppen eingeteilt:

- Gruppe 1 bestand aus 20 Probanden (jeweils zehn Sehende, zehn Blinde/Sehbeeinträchtigte). Diese Gruppe bewertete das harmonisierte Stationär-Geräusch in einem ersten Versuchsblock und alle weiteren Stationär-Geräusche (inklusive des harmonisierten Geräusches) in einem zweiten Versuchsblock.
- Gruppe 2 bestand aus 21 Probanden. Diese Gruppe bewertete alle Stationär-Geräusche in einem Versuchsblock.

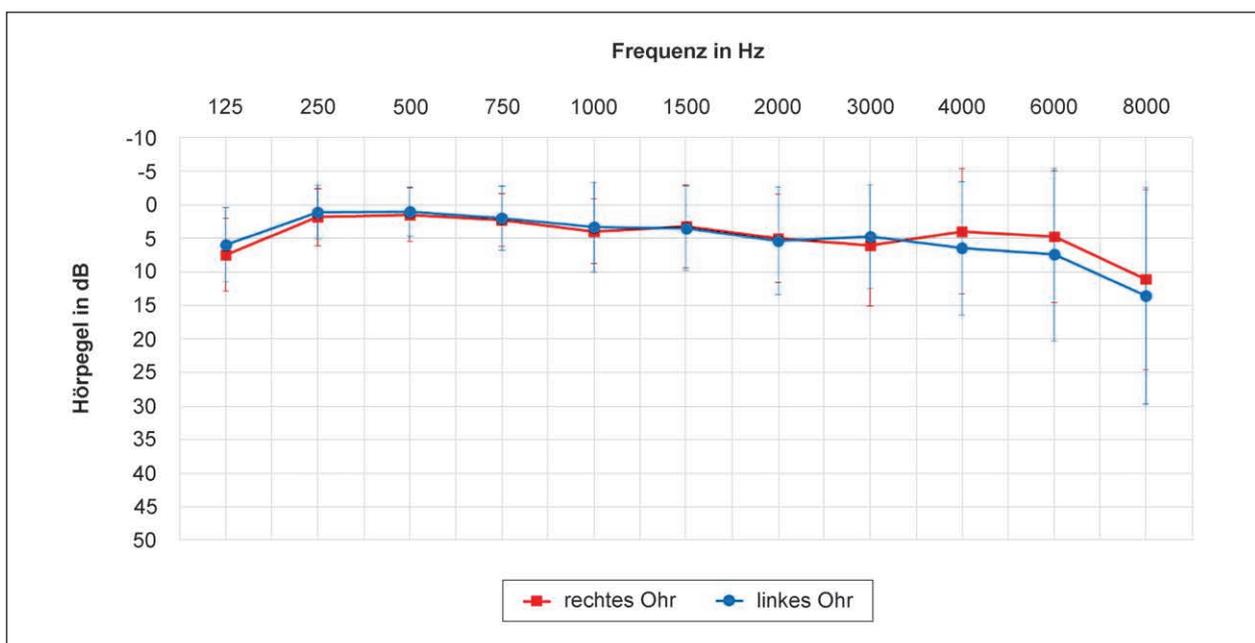


Bild 36: Mittlere Ruhehörschwelle aller Probanden (rechtes Ohr: rot, linkes Ohr: blau)

5.6.3 Fußgängerüberweg – Anfahren (Situation 1)

Eine auditiv schwer zu erfassende Situation ist der Anhaltevorgang bzw. der Anfahrvorgang eines Fahrzeuges an einer Querungssituation z. B. an einem Zebrastreifen. Für das sichere Überqueren eines Fußgängerüberweges sind sehbeeinträchtigte Verkehrsteilnehmer darauf angewiesen, zu erkennen, ob ein Fahrzeug auch wirklich angehalten hat.

In diesem Versuch fuhr ein Fahrzeug aus der Halteposition heraus mit einem geschwindigkeitsabhängigen Geräusch an. Vor dem Anfahrgeräusch wurde entweder ein Stationär-Geräusch erzeugt, oder das Fahrzeug startete aus dem Ruhezustand.

Versuchsbeschreibung

Ziel des Experimentes war die Messung der Reaktionszeit, die eine Versuchsperson benötigt, um auf die auditive Erkennung eines anfahrenden Fahrzeuggeräusches gegenüber einem Hintergrundgeräusch (TU-Hintergrund) zu reagieren. Der gedanklich am Fußgängerüberweg stehende Proband sollte im Hörversuch auf den Zeitpunkt reagieren, bei dem ein stehendes Fahrzeug anfährt. Bei der Anfahr-Szene stand das Fahrzeug bereits am Fußgängerüberweg und fuhr los. Während der Fahrt wurden im Experiment verschiedene geschwindigkeitsabhängige Geräusche erzeugt. Im Stillstand verblieb das Fahrzeug in Ruhe oder es wurde ein Stationär-Geräusch abgestrahlt. Die Probanden sollten die Frage beantworten: „Wann erkennen Sie das Anfahren des Fahrzeuges?“ (vgl. Bild 37).

Bei diesem Versuch wurden sowohl die Wiedergabereihenfolge der Paarungen aus Fahrzeug- und Hintergrundgeräusch, als auch die Anfahrzeitpunkte der Fahrzeuge randomisiert dargeboten. Die Versuchspersonen sollten auf die Erkennung des wahrgenommenen Fahrzeuggeräusches per Mausklick reagieren. Die gemessenen Reaktionszeiten wurden in einer Excel-Tabelle abgelegt. Im Versuchs-Setup wurden alle determinierten Delays bestimmt und kompensiert. Die Summe der nicht korrigierbaren hardwarebedingten Verzögerungszeiten wurden mit < 10 ms bestimmt. Dieser Betrag stellt den Fehler der Reaktionszeitmessung dar – ist aber vernachlässigbar klein.

Die Benutzeroberfläche (vgl. Bild 38) wurde als Matlab-GUI implementiert. Dem eigentlichen Hör-

versuch wurde ein Training vorangestellt, in dem verschiedene Situationen dargeboten wurden. Die Probanden konnten sich mittels der Trainingsstimuli gut einhören und erhielten zusätzlich vom Versuchsleiter Erläuterungen zur gehörten Verkehrsszene.

Ergebnisse

Die Ergebnisse der Detektionsversuche für die Situation „Anfahren“ sind als Boxplots im Bild 39 und Bild 41 dargestellt. Dabei zeigt Bild 39 die Ergebnisse für die UN-Geräusche und Bild 41 die Ergebnisse für die US-Geräusche. Die y-Achsen zeigen hier

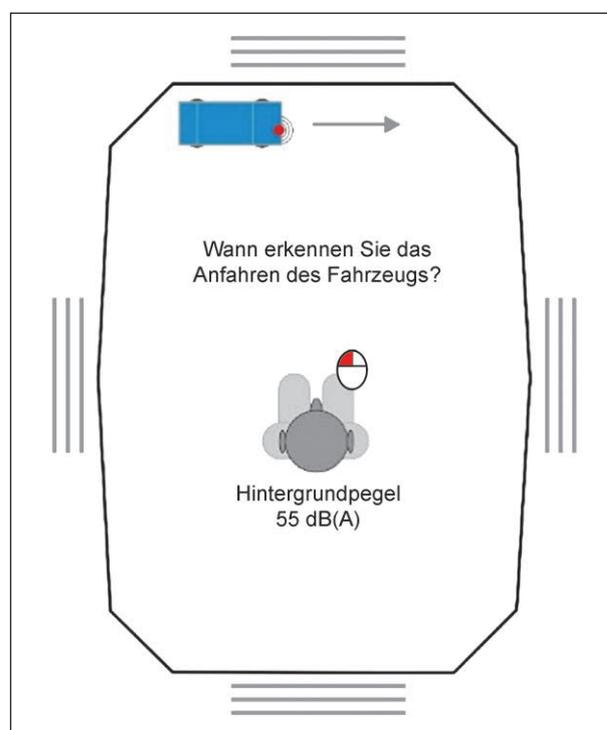


Bild 37: Beispielhafte Darstellung des Versuchsaufbaus für ein anfahrendes Fahrzeug in Situation 1

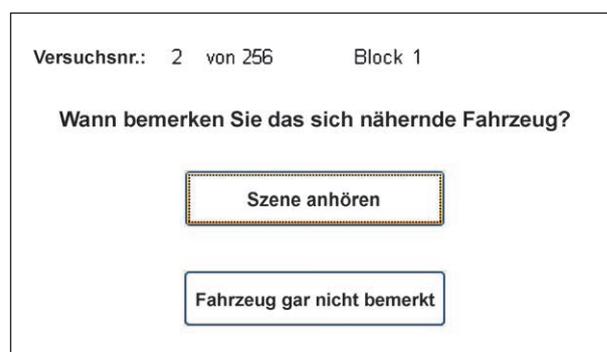


Bild 38: Beispielhafte Versuchsoberfläche des Hörversuchs Reaktionszeitmessung

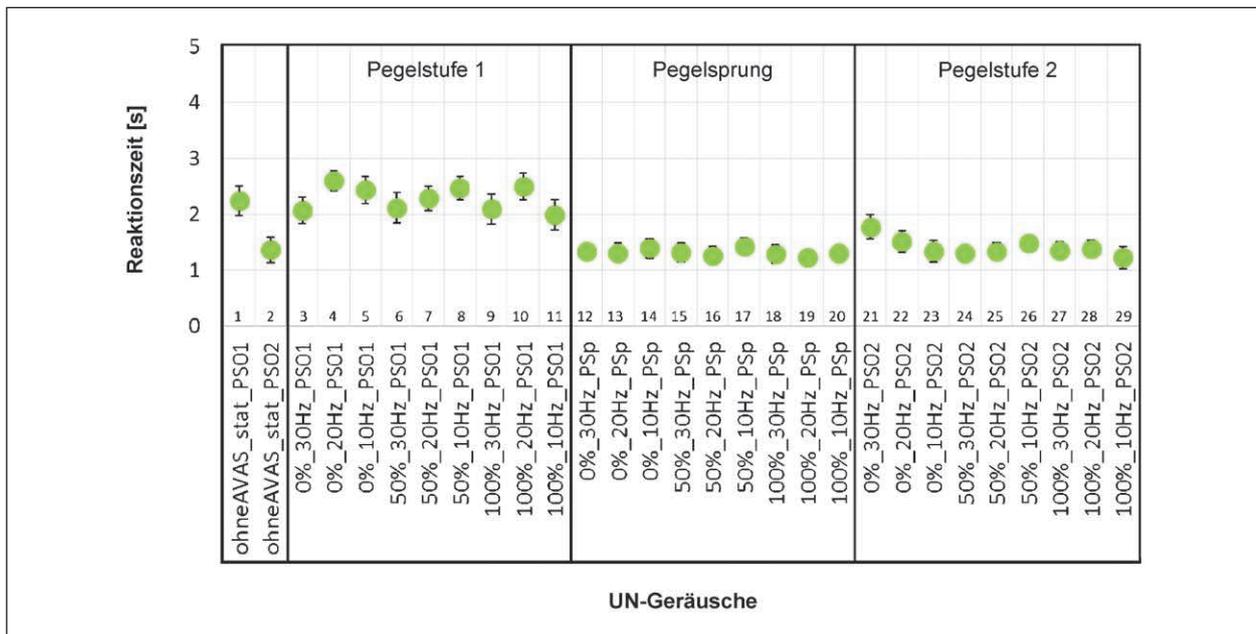


Bild 39: Darstellung der Ergebnisse für die Situation „Anfahren“ für alle UN-Geräusche

Name	Pegel in dB über Minimalpegel für Stationär-Geräusch	Pegel in dB über Minimalpegel für Fahrgeräusch	Frequenzsprung in % Motorordnung	Rauigkeitsänderung (Ordnungsabstand)
Geräusch 3	9	9	0	30
Geräusch 4	9	9	0	20
Geräusch 5	9	9	0	10
Geräusch 6	9	9	-50	30
Geräusch 7	9	9	-50	20
Geräusch 8	9	9	-50	10
Geräusch 9	9	9	-100	30
Geräusch 10	9	9	-100	20
Geräusch 11	9	9	-100	10

Tab. 3: Schematische Darstellung der Variationen der Stationär-Geräusche am Beispiel der Pegelstufe 1

die Reaktionszeiten nach dem tatsächlichen Anfahrtszeitpunkt in Sekunden. Dabei sind die Mediane der Ergebnisse und deren Konfidenzintervalle dargestellt. Die ersten zwei Datenpunkte zeigen die Ergebnisse für die Geräusche ohne AVAS_stat. Dabei stellt Datenpunkt 1 das Ergebnis für die Pegelstufe 1 (PS01) und Datenpunkt 2 das Ergebnis für die 6 dB lauterer Geräusche (Pegelstufe 2 (PS02)) dar.

Die Datenpunkte 3-11 zeigen die Ergebnisse für die Geräusche bei denen jeweils das Stationär-Geräusch als auch das Fahrgeräusch denselben niedrigen Pegel (Pegelstufe 1) aufwies. Die Datenpunkte 21-29 zeigen die Ergebnisse für die Geräusche, bei denen das Stationär-Geräusch und das Fahrge-

räusch denselben 6 dB höheren Pegel (Pegelstufe 2) besaßen. Bei den Datenpunkten 12-20 wiesen die Anfahrgeräusche einen Pegelsprung auf, d. h. der Pegel des Stationär-Geräuschs entspricht dem niedrigen Pegel (Pegelstufe 1) und die Fahrgeräusche hatten den 6 dB höheren Pegel. Innerhalb dieser drei Gruppen wurden die Stationär-Geräusche nach demselben Schema variiert. Dieses Schema ist anhand des Beispiels für die niedrige Pegelstufe (Pegelstufe 1) (Geräusche 3-11) in Tabelle 3 dargestellt.

Die Ergebnisse der unterschiedlichen Stationär-Geräusch-Parameter wurden miteinander verglichen. Dabei zeigen sich in den Detektionszeiten der UN-Geräusche folgende signifikante Unterschiede:

- Zwischen den Pegelstufen ($p < 0,0005$):
 - Geräusche mit Pegelstufe 1 wurden signifikant später detektiert als Geräusche mit Pegelsprung ($p < 0,0005$) oder Pegelstufe 2 ($p < 0,0005$),
 - Geräusche mit Pegelstufe 2 wurden signifikant später detektiert als Geräusche mit Pegelsprung ($p = 0,039$).
- Zwischen den Frequenzsprüngen ($p < 0,0005$):
 - Geräusche mit Frequenzsprung 0 % wurden signifikant später detektiert als Geräusche mit Frequenzsprung 50 % ($p = 0,003$) und 100 % ($p < 0,0005$),
 - Geräusche mit Frequenzsprung 50 % wurden signifikant später detektiert als Geräusche mit Frequenzsprung 100 % ($p < 0,0005$).
- Interaktion Pegel und Frequenzsprung ($p = 0,045$),
- Interaktion Pegel und Rauigkeitsänderung ($p = 0,001$),
- Interaktion Frequenzsprung und Rauigkeitsänderung ($p = 0,030$),
- Interaktion Pegel, Frequenzsprung und Rauigkeitsänderung ($p < 0,0005$).

In einem zweiten Schritt wurden die UN-Geräusche mit Stationär-Geräusch mit den jeweiligen Geräuschen des gleichen Pegels aber ohne AVAS_stat verglichen. In Tabelle 4 ist dargestellt, dass sich die meisten Detektionszeiten der verschiedenen Stationär-Geräusche nicht signifikant von den Ergebnis-

sen der Geräusche ohne AVAS_stat bei der entsprechenden Pegelstufe unterscheiden. Einzig die Parameterkombinationen Frequenzsprung 50 % und Rauigkeitsänderung 30 Hz ($p = 0,050$) und Frequenzsprung 100 % und Rauigkeitsänderung 30 Hz ($p = 0,002$) zeigen signifikante Unterschiede im Vergleich zu den Geräuschen ohne AVAS_stat und wurden somit signifikant früher detektiert.

Zwischen den Gruppen und den Geschlechtern zeigen sich keine signifikanten Unterschiede. Allein ein signifikanter Unterschied der Reaktionszeiten des Geräusches 24 (Pegelstufe 2, Frequenzsprung 50 % und Rauigkeitsänderung 30 Hz) zeigt sich zwischen den Blinden/Sehbeeinträchtigten und Sehenden ($p = 0,039$) (vgl. roter Kreis in Bild 40).

Anhand der statistischen Auswertungen ergeben sich für die US-Geräusche folgende signifikante Unterschiede (siehe Bild 41):

- Zwischen den Pegelstufen ($p < 0,0005$):
 - Geräusche mit Pegelsprung oder Pegelstufe 2 wurden signifikant früher detektiert als Geräusche mit Pegelstufe 1 ($p < 0,0005$),
 - Geräusche mit Pegelsprung wurden signifikant früher detektiert als Geräusche mit Pegelstufe 2 ($p < 0,0005$).
- Zwischen den Frequenzsprüngen ($p < 0,0005$):
 - Geräusche mit Frequenzsprung 0 % wurden signifikant später detektiert als Geräusche mit Frequenzsprung 50 % und 100 % ($p < 0,0005$),
 - Geräusche mit Frequenzsprung 50 % wurden später detektiert als Geräusche mit Frequenzsprung 100 % ($p < 0,0005$).

Ohne Stationär-Geräusch	Mit Stationär-Geräusch	Signifikanz
Geräusch 01/Geräusch 02	Frequenzsprung 0 %, Rauigkeitsänderung 30 Hz	0,573
	Frequenzsprung 0 %, Rauigkeitsänderung 20 Hz	0,422
	Frequenzsprung 0 %, Rauigkeitsänderung 10 Hz	0,988
	Frequenzsprung 50 %, Rauigkeitsänderung 30 Hz	0,050
	Frequenzsprung 50 %, Rauigkeitsänderung 20 Hz	0,298
	Frequenzsprung 50 %, Rauigkeitsänderung 10 Hz	0,576
	Frequenzsprung 100 %, Rauigkeitsänderung 30 Hz	0,078
	Frequenzsprung 100 %, Rauigkeitsänderung 20 Hz	0,146
	Frequenzsprung 100 %, Rauigkeitsänderung 10 Hz	0,002

Tab. 4: Paarweise Vergleiche zwischen UN-Geräuschen ohne Stationär-Geräusch und den UN-Geräuschen mit Stationär-Geräusch und den einzelnen Parametervariationen für die Situation „Anfahren“

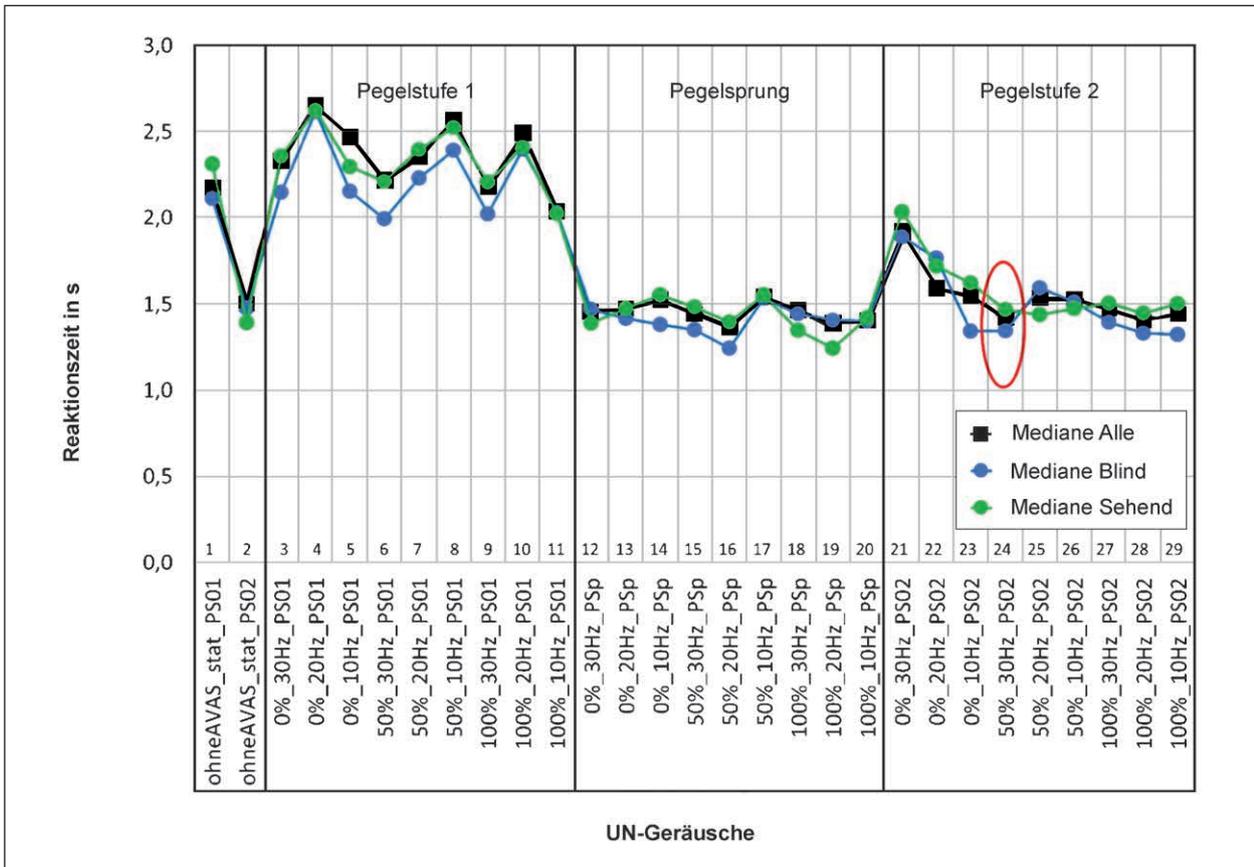


Bild 40: Darstellung der Ergebnisse für die Situation „Anfahren“ für alle UN-Geräusche – getrennt für Blinde/Sehbeeinträchtigte und Sehende

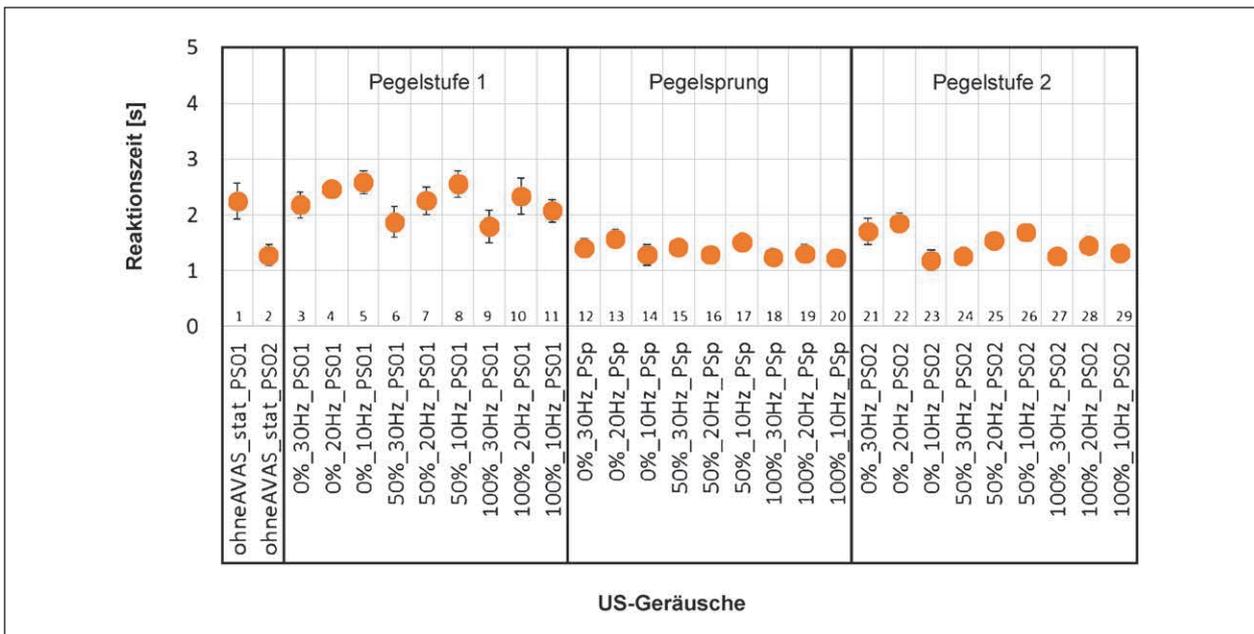


Bild 41: Darstellung der Ergebnisse für die Situation „Anfahren“ für alle US-Geräusche

- Zwischen den Rauigkeitsänderung ($p < 0,0005$):
 - Geräusche mit Rauigkeitsänderung 20 Hz ($p < 0,0005$) und 10 Hz ($p = 0,001$) wurden später detektiert als Geräusche mit Rauigkeitsänderung 30 Hz.
- Interaktion von Pegel und Frequenzsprung ($p = 0,012$),
- Interaktion von Pegel und Rauigkeitsstufen ($p < 0,0005$),
- Interaktion von Frequenzsprung und Rauigkeitsstufen ($p < 0,0005$),
- Interaktion von Pegel, Frequenzsprung und Rauigkeitsstufen ($p < 0,0005$).

In einem zweiten Schritt wurden die US-Geräusche mit Stationär-Geräusch ebenfalls mit den jeweiligen US-Geräuschen des gleichen Pegels aber ohne AVAS_stat miteinander verglichen. In Tabelle 5 ist dargestellt, dass die Geräusche mit der Parameterkombination Frequenzsprung 0 % und Rauigkeitsänderung 20 Hz ($p = 0,001$) und Frequenzsprung 50 % und Rauigkeitsänderung 10 Hz ($p = 0,031$) signifikant später detektiert wurden und Geräusche mit der Parameterkombination Frequenzsprung 50 % und Rauigkeitsänderung 30 Hz ($p = 0,028$)

und Frequenzsprung 100 % und Rauigkeitsänderung 30 Hz ($p = 0,009$) signifikant früher detektiert wurden als Geräusche ohne AVAS_stat.

Für die US-Geräusche in der Situation „Anfahren“ zeigen sich zwischen Gruppe 1 und Gruppe 2 und zwischen den Geschlechtern keine signifikanten Unterschiede in der Reaktionszeit.

Einzig bei Geräusch 18 (Pegelsprung, Frequenzsprung 100 %, Rauigkeitsänderung 30 Hz) (Bild 42,

Geräusche mit AVAS_stat		Signifikanz
Frequenzsprung 0 %	Rauigkeitsänderung 30 Hz	0,096
	Rauigkeitsänderung 20 Hz	0,001
	Rauigkeitsänderung 10 Hz	0,085
Frequenzsprung 50 %	Rauigkeitsänderung 30 Hz	0,028
	Rauigkeitsänderung 20 Hz	0,903
	Rauigkeitsänderung 10 Hz	0,031
Frequenzsprung 100 %	Rauigkeitsänderung 30 Hz	0,009
	Rauigkeitsänderung 20 Hz	0,853
	Rauigkeitsänderung 10 Hz	0,071

Tab. 5: Paarweise Vergleiche zwischen US-Geräuschen ohne Stationär-Geräusch und den US-Geräuschen mit Stationär-Geräusch und den einzelnen Parameterkombinationen für die Situation „Anfahren“

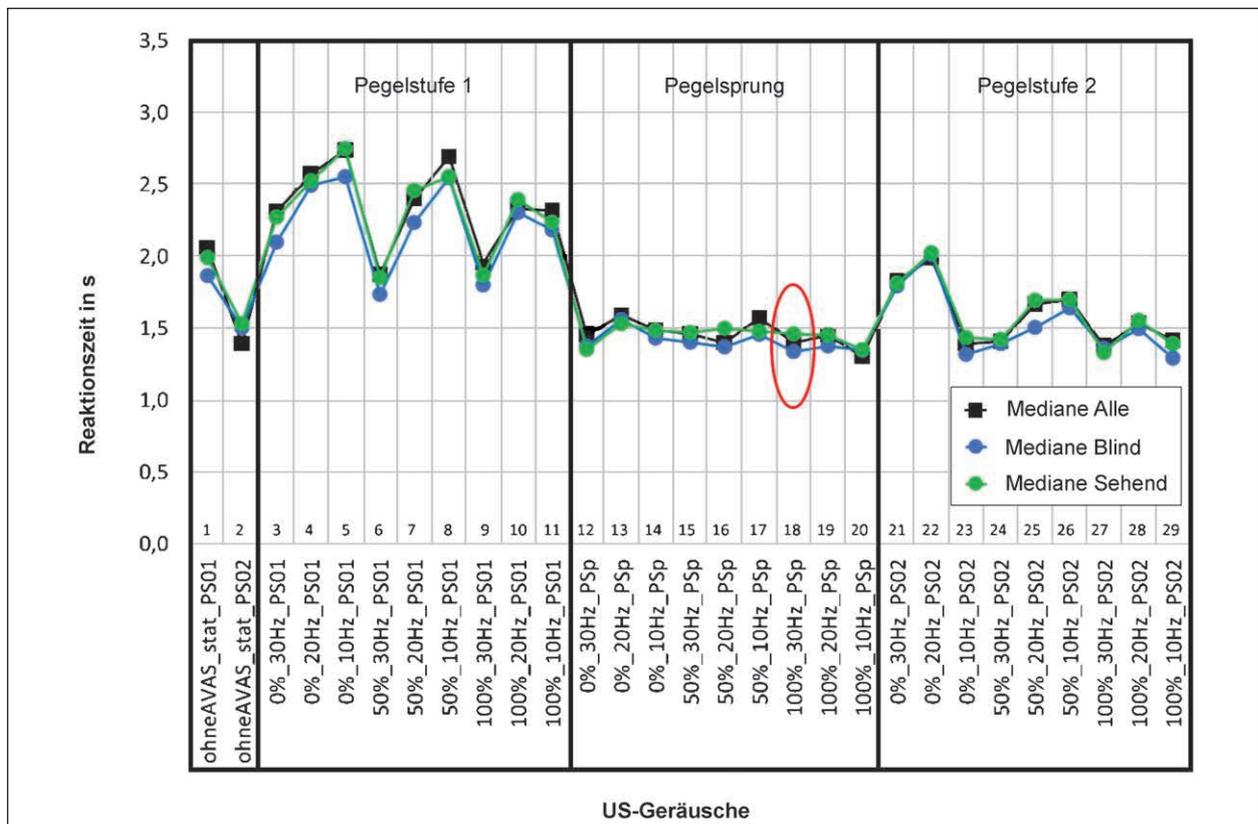


Bild 42: Darstellung der Ergebnisse für die Situation „Anfahren“ für alle US-Geräusche – getrennt für die zwei Gruppen

roter Kreis) zeigen sich signifikante Unterschiede in der Reaktionszeit zwischen blinden und sehenden Probanden.

5.6.4 Fußgängerüberweg – Anhalten (Situation 1)

Versuchsbeschreibung

Ziel des Experimentes war die Messung der Reaktionszeit, die eine Versuchsperson benötigt, um auf die auditive Erkennung eines anhaltenden Fahrzeuggeräusches gegenüber einem Hintergrundgeräusch (TU-Hintergrund) zu reagieren. Der gedanklich am Fußgängerüberweg stehende Proband sollte im Hörversuch auf den Zeitpunkt reagieren, bei dem ein herannahendes Fahrzeug zum Stillstand gekommen ist. Bei der Anhalte-Szene näherte sich ein Fahrzeug und bremste bis zum virtuellen Fußgängerüberweg ab. Während der Fahrt wurden im Experiment verschiedene geschwindigkeitsabhängige Geräusche erzeugt. Ab dem Stillstand verblieb das Fahrzeug in Ruhe oder es wurde ein Stationär-Geräusch abgestrahlt. Die Probanden sollten die Frage beantworten: „Wann erkennen Sie das Anhalten des herannahenden Fahrzeuges?“ (vgl. Bild 43).

Ergebnisse

Die Ergebnisse der Detektionsversuche für die Situation „Anhalten“ sind in Bild 44 und Bild 46 dargestellt.

Dabei zeigt Bild 44 die Ergebnisse für die UN-Geräusche, welche zeigen, dass es signifikante Unterschiede zwischen den Pegelstufen ($p = 0,003$) gibt. Ebenfalls zeigt die statistische Auswertung signifikante Unterschiede zwischen den verschiedenen Frequenzsprüngen ($p < 0,0005$).

Die paarweisen Vergleiche mit Bonferroni-Korrektur zeigen detailliertere signifikante Unterschiede zwischen den Haupteffekten:

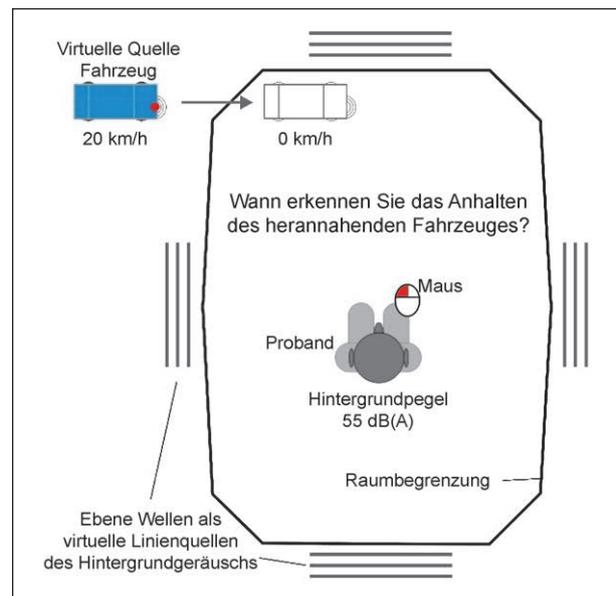


Bild 43: Beispielhafte Darstellung des Versuchsaufbaus für ein anhaltendes Fahrzeug in Situation 1

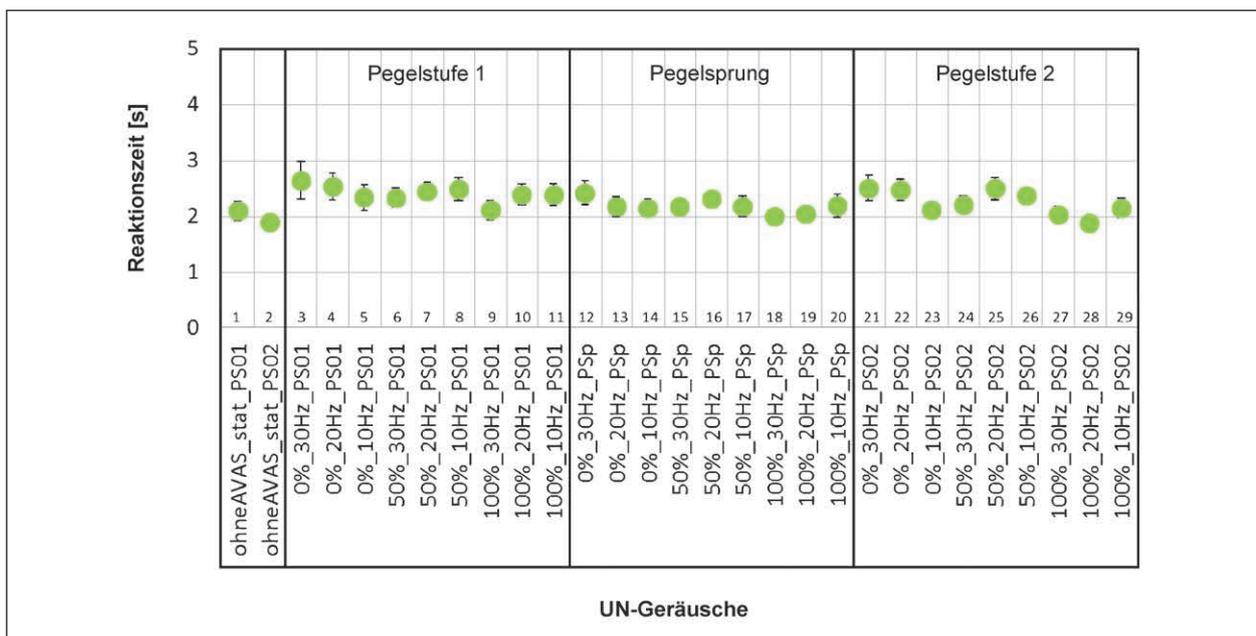


Bild 44: Darstellung der Ergebnisse für die Situation „Anhalten“ für alle UN-Geräusche

- Geräusche mit Pegelstufe 1 wurden signifikant später detektiert als Geräusche mit einem Frequenzsprung ($p < 0,0005$) und Geräusche mit der Pegelstufe 2 ($p = 0,003$),
- Geräusche mit Frequenzsprung 100 % wurden signifikant früher detektiert als Geräusche mit Frequenzsprung 0 % ($p < 0,0005$) und Geräusche mit Frequenzsprung 50 % ($p < 0,0005$).

Auch folgende Interaktionen zeigen signifikante Effekte:

- Pegel und Frequenzsprung ($p = 0,008$),
- Frequenzsprung und Rauigkeitsänderung ($p < 0,0005$),
- Pegel, Frequenzsprung und Rauigkeitsänderung ($p = 0,031$).

Detailliertere signifikante Unterschiede in Detektionszeiten zeigen die Kontraste zwischen den Parametern der Stationär-Geräusche. Tabelle 24 im Anhang zeigt die signifikanten Ergebnisse für diese Situation. Die Tabelle zeigt die Ergebnisse für Haupteffekte und Interaktionen dieser. So zeigt sich z. B. für den Haupteffekt „Pegel“, dass der erste Kontrast: Pegelstufe 1 vs. Pegelsprung und Pegelstufe 2 signifikant ist ($p = 0,001$). Ebenfalls sind signifikante Unterschiede bei den Frequenzsprüngen zu sehen ($p < 0,0005$). Die Rauigkeitsänderung allein zeigt keine signifikanten Unterschiede in den Detektionszeiten. Interessant sind die Interaktionen dieser Haupteffekte. Die ersten signifikanten Unterschiede zeigen sich, wenn die Reaktionszeiten des Pegelsprungs mit denen der Pegelstufe 2 verglichen werden und Frequenzsprung 50 % benutzt wird im Vergleich zu Frequenzsprung 100 %. Hier zeigen sich signifikante Unterschiede in den Detektionszeiten ($p = 0,003$).

In einem zweiten Schritt wurden die Geräusche mit Stationär-Geräusch mit den jeweiligen Geräuschen des gleichen Pegels aber ohne AVAS_stat miteinander verglichen. Hier zeigen sich folgende signifikante Unterschiede: Anhand der Tabelle 6 zeigt sich, dass alle Stationär-Geräusch-Kombinationen signifikant später detektiert wurden als das Geräusch ohne AVAS_stat bei der entsprechenden Pegelstufe. Einzig die Parameterkombination Frequenzsprung 100 % und Rauigkeitsänderung 30 Hz zeigt keine signifikanten Unterschiede.

Für die Situation „Anhalten“ zeigen sich zwischen den zwei Gruppen und zwischen den Geschlech-

tern keine signifikanten Unterschiede bei der Detektionszeit der UN-Geräusche. Lediglich zwischen den Blinden und Sehenden zeigen sich bei der Bewertung der UN-Geräusche bei zwei Geräuschen signifikante Unterschiede (vgl. Bild 45). Bei dem Geräusch 01 (ohne AVAS_stat, Pegelstufe 1) bewerteten die Blinden und Sehbeeinträchtigten später als die Sehenden ($p = 0,02$). Ebenfalls urteilten die Blinden/Sehbeeinträchtigten signifikant später als die Sehenden bei dem Geräusch 14 (Pegelsprung, Frequenzsprung 0 %, Rauigkeitsänderung 10 Hz) ($p = 0,02$). Die signifikanten Unterschiede sind mit einem roten Kreis in Bild 45 gekennzeichnet.

Die Ergebnisse der US-Geräusche sind in Bild 46 aufgezeigt. Hier zeigen sich ähnliche Tendenzen wie bei den UN-Geräuschen.

Bei der Bewertung der US-Geräusche zeigen sich folgende signifikante Unterschiede:

- Zwischen den Pegelstufen ($p < 0,0005$):
 - Geräusche mit Pegelstufe 1 wurden signifikant später detektiert als Geräusche mit Pegelsprung ($p = 0,009$) und Pegelstufe 2 ($p < 0,0005$).
- Zwischen den Frequenzsprüngen ($p < 0,0005$):
 - Geräusche mit Frequenzsprung 100 % wurden signifikant früher detektiert als Geräusche mit Frequenzsprung 0 % ($p < 0,0005$) und Geräusche mit Frequenzsprung 50 % ($p = 0,001$).
- Interaktion von Pegel und Frequenzsprung ($p = 0,022$),

Geräusche mit AVAS_stat		Signifikanz
Frequenzsprung 0 %	Rauigkeitsänderung 30 Hz	< 0,0005
	Rauigkeitsänderung 20 Hz	< 0,0005
	Rauigkeitsänderung 10 Hz	0,001
Frequenzsprung 50 %	Rauigkeitsänderung 30 Hz	< 0,0005
	Rauigkeitsänderung 20 Hz	< 0,0005
	Rauigkeitsänderung 10 Hz	< 0,0005
Frequenzsprung 100 %	Rauigkeitsänderung 30 Hz	0,070
	Rauigkeitsänderung 20 Hz	0,043
	Rauigkeitsänderung 10 Hz	0,001

Tab. 6: Paarweise Vergleiche zwischen UN-Geräuschen ohne Stationär-Geräusch und den UN-Geräuschen mit Stationär-Geräusch und den einzelnen Parametervariationen für die Situation „Anhalten“

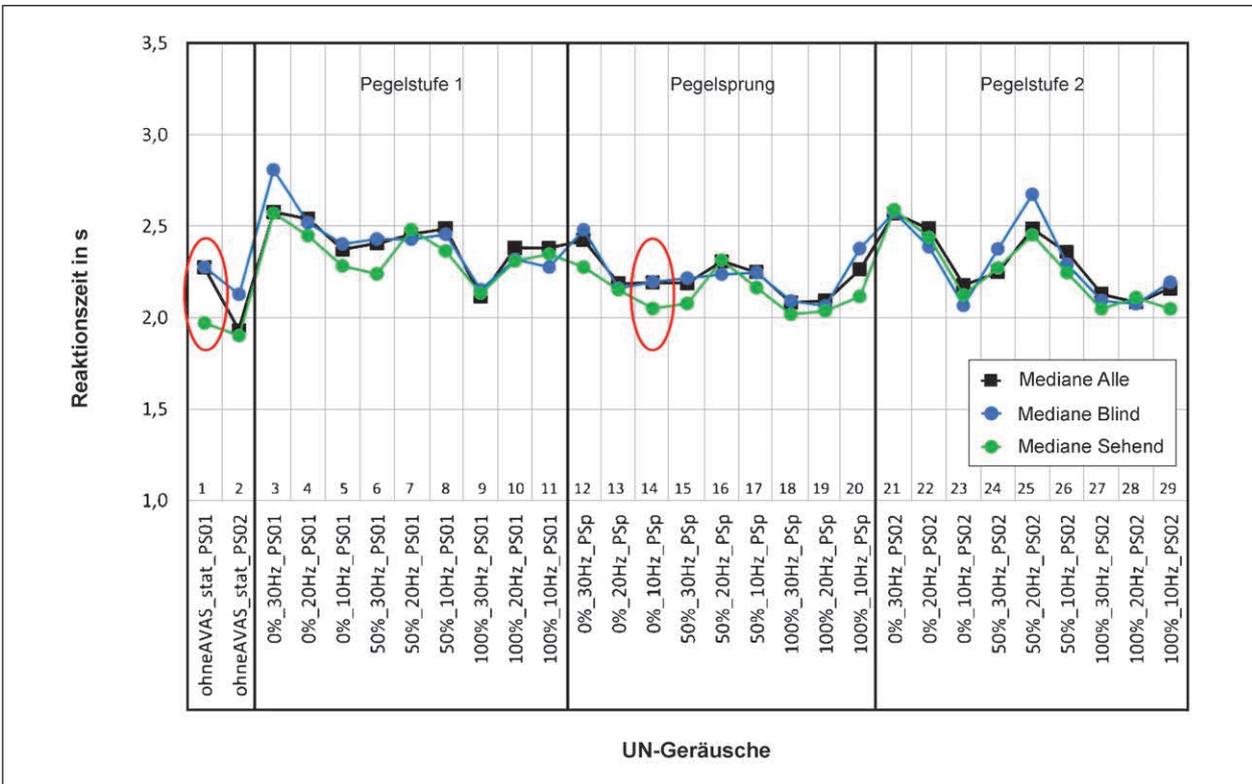


Bild 45: Darstellung der Ergebnisse für die Situation „Anhalten“ für alle UN-Geräusche – getrennt für die Blinden/Sehbeeinträchtigten und Sehenden

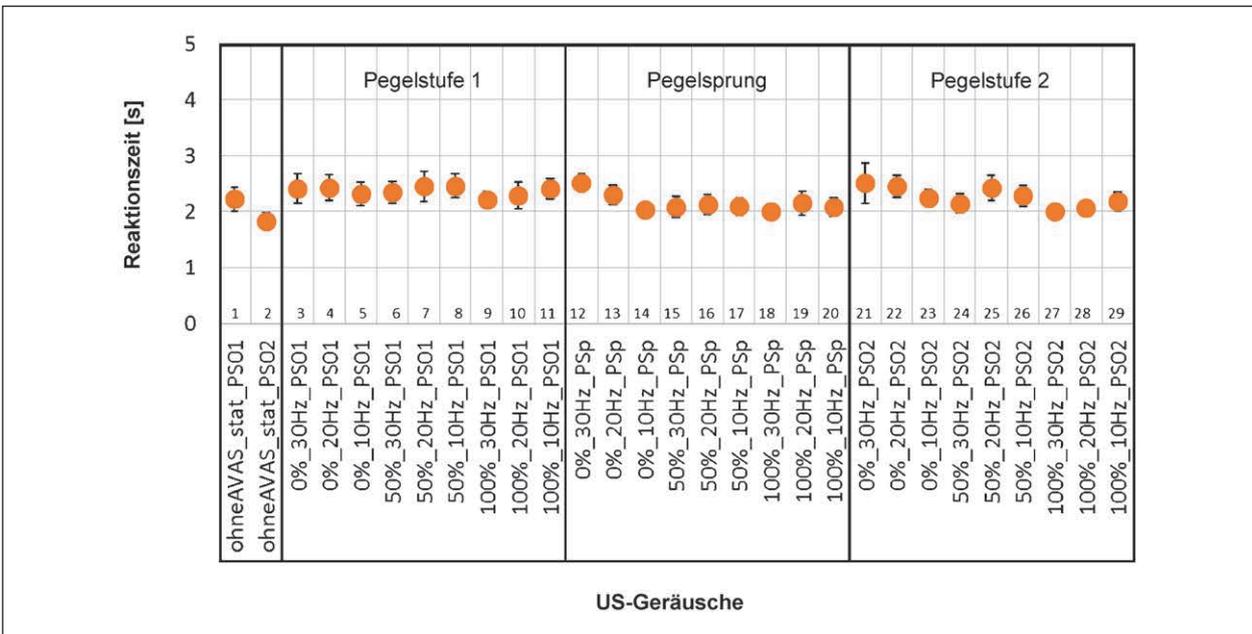


Bild 46: Darstellung der Ergebnisse für die Situation „Anhalten“ für alle US-Geräusche

- Interaktion von Frequenzsprung und Rauigkeitsänderung ($p < 0,0005$),
- Geräusche mit einer Rauigkeitsänderung von 20 Hz wurden signifikant später detektiert als Geräusche mit Rauigkeitsänderung von 10 Hz ($p = 0,034$).

In einem zweiten Schritt wurden die Geräusche mit Stationär-Geräusch mit den jeweiligen Geräuschen des gleichen Pegels aber ohne AVAS_stat miteinander verglichen. Hier zeigen sich folgende signifikante Unterschiede: Anhand der Tabelle 7 zeigt sich, dass Stationär-Geräusche mit Frequenzsprung 0 % signifikant später detektiert wurden als das Geräusch ohne AVAS_stat bei der entsprechenden Pegelstufe. Des Weiteren wurden die Geräusche mit AVAS_stat, Frequenzsprung 50 % und Rauigkeitsänderung 20 Hz und 10 Hz signifikant später detektiert als Geräusche ohne AVAS_stat.

Für die Situation „Anhalten“ zeigen sich zwischen den zwei Gruppen und den Geschlechtern keine signifikanten Unterschiede bei der Detektionszeit der US-Geräusche. Lediglich zwischen den Blinden und Sehenden zeigen sich bei den Detektionszeiten der UN-Geräusche bei drei Geräuschen signifikante Unterschiede (vgl. Bild 47). Bei dem Ge-

räusch 01 (ohne AVAS_stat, Pegelstufe 1) bewerteten die blinden und Sehbeeinträchtigten später als die Sehenden ($p = 0,006$). Ebenfalls urteilten die Blinden/Sehbeeinträchtigten signifikant später als die Sehenden bei dem Geräusch 20 (Pegelsprung, Frequenzsprung 100 %, Rauigkeitsänderung 10 Hz) ($p = 0,039$). Die signifikanten Unterschiede sind mit einem roten Kreis in Bild 47 gekennzeichnet.

Geräusche mit AVAS_stat		Signifikanz
Frequenzsprung 0 %	Rauigkeitsänderung 30 Hz	0,001
	Rauigkeitsänderung 20 Hz	0,001
	Rauigkeitsänderung 10 Hz	0,011
Frequenzsprung 50 %	Rauigkeitsänderung 30 Hz	0,059
	Rauigkeitsänderung 20 Hz	0,009
	Rauigkeitsänderung 10 Hz	0,020
Frequenzsprung 100 %	Rauigkeitsänderung 30 Hz	0,570
	Rauigkeitsänderung 20 Hz	0,161
	Rauigkeitsänderung 10 Hz	0,230

Tab. 7: Paarweise Vergleiche zwischen US-Geräuschen ohne Stationär-Geräusch und den US-Geräusch mit Stationär-Geräusch und den einzelnen Parametervariationen für die Situation „Anhalten“

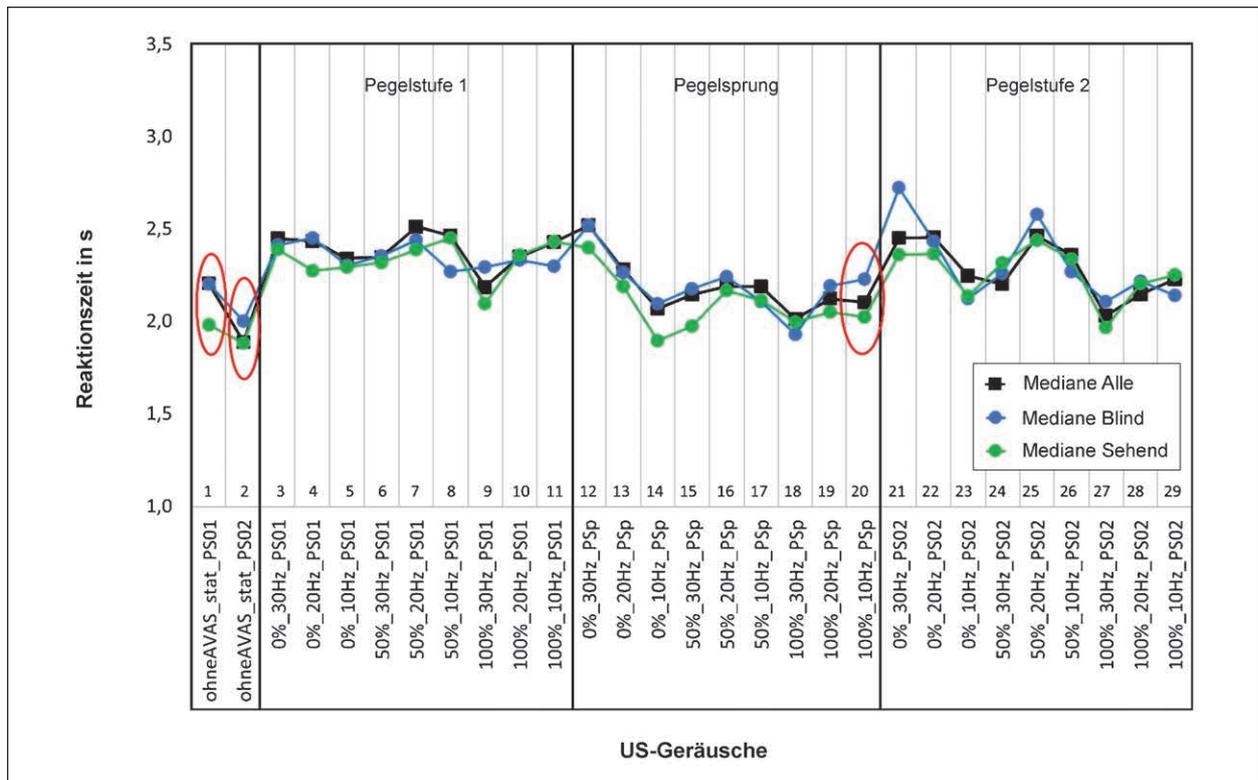


Bild 47: Darstellung der Ergebnisse für die Situation „Anhalten“ für alle US-Geräusche – getrennt für die Blinden/Sehbeeinträchtigten und Sehenden

5.6.5 Parkplatz (Situation 2)

Auf Parkplätzen sind die Abstände zwischen Fahrzeugen und Passanten besonders gering, weshalb es häufig zu sicherheitskritischen Situationen kommt. In diesen Situationen sind besonders Fußgänger darauf angewiesen, anfahrende Fahrzeuge schnell zu lokalisieren. Auch bei dieser Situation wurden alle Fahr- und Stationär-Geräusche mit einem Hintergrundgeräusch präsentiert. Dabei wurden nochmals randomisierte Verzögerungszeiten zwischen 2 und 4 s bis zum Einsetzen des Geräuschs genutzt. In der Parkplatzsituation wurde das Rückwärtsfahren eines Elektrofahrzeugs untersucht, da dieses den Worst-Case darstellt und somit die Vorwärtsausparksituation mit abdeckt.

Versuchsbeschreibung

Ziel des Experimentes war die Messung der Reaktionszeit, die eine Versuchsperson benötigt, um auf die auditive Erkennung eines ausparkenden Fahrzeuges gegenüber einem Hintergrundgeräusch zu

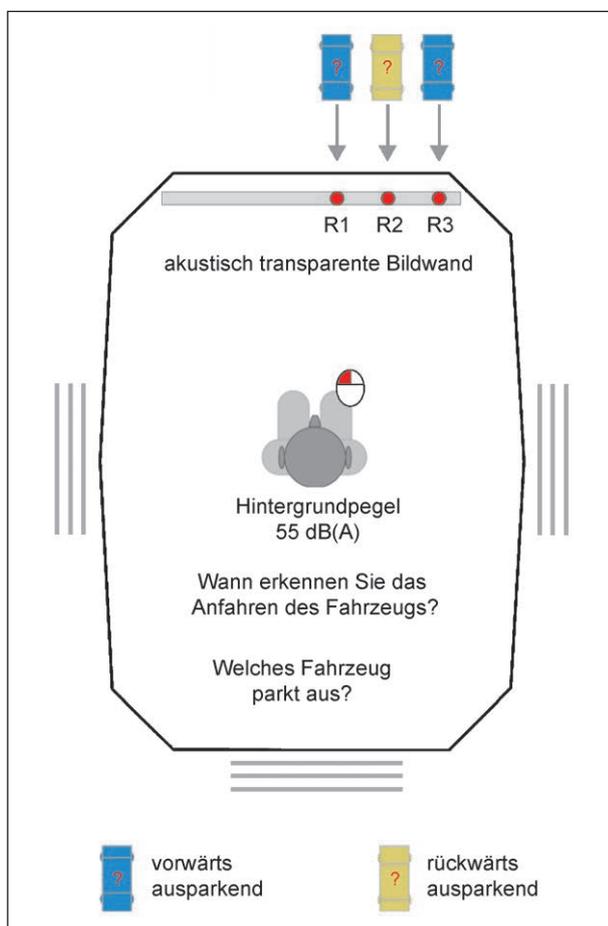


Bild 48: Darstellung des Versuchsaufbaus für ein ausparkendes Fahrzeug in Situation 2

reagieren. Die Versuchspersonen reagierten auf die Erkennung des wahrgenommenen Fahrzeuggeräusches per Mausklick (vgl. Bild 48). Des Weiteren sollten die Versuchspersonen die Fahrzeuge orten, indem Sie die Frage beantworten: „Welches Fahrzeug parkt aus?“ Aufgrund der Symmetrie und der hohen Anzahl an Versuchen wurden die Versuche mit drei Parklücken durchgeführt (R1-R3).

Bei Gruppe 2 hat ein Proband die Durchführung der Hörversuche abgebrochen, sodass an den Hörversuchen der Situation 2 und 3 in Gruppe 2 nur noch 19 statt 20 Probanden teilnahmen.

Ergebnisse Reaktionszeiten

Die Reaktionszeiten für die Situation „Parkplatz“ sind für die UN-Geräusche für alle drei Parklücken gemittelt in Bild 49 aufgetragen, da sich zwischen den Parklücken keine signifikanten Unterschiede zeigen.

Werden die Ergebnisse der unterschiedlichen Stationär-Geräusch-Parameter miteinander verglichen, zeigen sich in den Detektionszeiten der UN-Geräusche folgende signifikante Unterschiede:

- Zwischen den Pegelstufen ($p < 0,0005$):
 - Geräusche mit Pegelstufe 1 wurden signifikant später detektiert als Geräusche mit Pegelsprung ($p < 0,0005$) oder Pegelstufe 2 ($p < 0,0005$).
- Zwischen den Frequenzsprüngen ($p < 0,0005$):
 - Geräusche mit Frequenzsprung 0 % wurden signifikant später detektiert als Geräusche mit Frequenzsprung 50 % ($p = 0,015$) und 100 % ($p < 0,0005$),
 - Geräusche mit Frequenzsprung 50 % wurden signifikant später detektiert als Geräusche mit Frequenzsprung 100 % ($p < 0,0005$).
- Zwischen den Rauigkeitsänderungen ($p < 0,0005$):
 - Geräusche mit Rauigkeitsänderung 30 Hz wurden signifikant früher detektiert als Geräusche mit Rauigkeitsänderung 20 Hz ($p < 0,0005$) und Rauigkeitsänderung 10 Hz ($p < 0,0005$).
- Interaktion Parklücke und Pegel ($p < 0,0005$),
- Interaktion Pegel und Frequenzsprung ($p < 0,0005$),

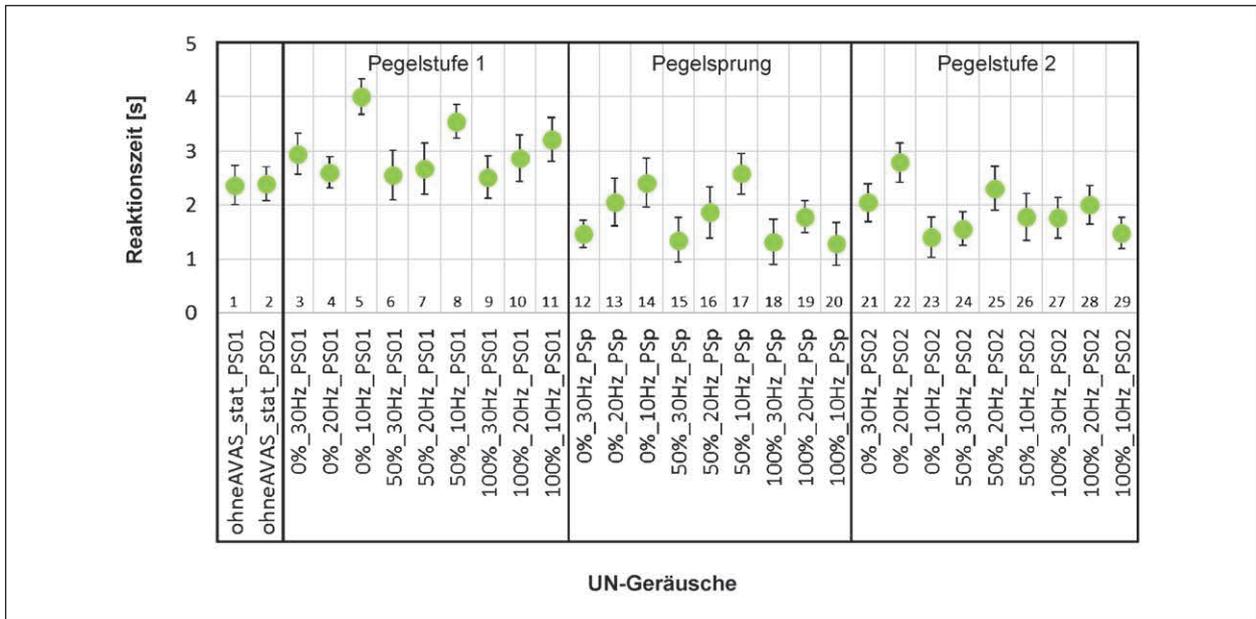


Bild 49: Detektionszeiten für die UN-Geräusche für die Situation „Parkplatz“

- Interaktion Parklücke, Pegel und Frequenzsprung ($p = 0,009$),
- Interaktion Parklücke und Rauigkeitsänderung ($p = 0,024$),
- Interaktion Pegel und Rauigkeitsänderung ($p < 0,0005$),
- Interaktion Frequenzsprung und Rauigkeitsänderung ($p < 0,0005$),
- Interaktion Pegel, Frequenzsprung und Rauigkeitsänderung ($p < 0,0005$).

Geräusche mit AVAS_stat		Signifikanz
Frequenzsprung 0 %	Rauigkeitsänderung 30 Hz	0,004
	Rauigkeitsänderung 20 Hz	0,540
	Rauigkeitsänderung 10 Hz	0,016
Frequenzsprung 50 %	Rauigkeitsänderung 30 Hz	< 0,0005
	Rauigkeitsänderung 20 Hz	0,815
	Rauigkeitsänderung 10 Hz	0,005
Frequenzsprung 100 %	Rauigkeitsänderung 30 Hz	< 0,0005
	Rauigkeitsänderung 20 Hz	0,966
	Rauigkeitsänderung 10 Hz	< 0,0005

Tab. 8: Paarweise Vergleiche zwischen UN-Geräuschen ohne Stationär-Geräusch und den UN-Geräuschen mit Stationär-Geräusch und den einzelnen Parametervariationen für die Situation „Parkplatz“

In einem zweiten Schritt wurden die Geräusche mit Stationär-Geräusch mit den jeweiligen Geräuschen des gleichen Pegels aber ohne AVAS_stat miteinander verglichen. Anhand der Tabelle 8 zeigt sich, dass Stationär-Geräusche mit Frequenzsprung 0 % und Rauigkeitsänderung 10 Hz als auch Geräusche mit Frequenzsprung 50 % und Rauigkeitsänderung 10 Hz signifikant später detektiert wurden als das Geräusch ohne AVAS_stat bei der entsprechenden Pegelstufe. Des Weiteren wurden die Geräusche mit AVAS_stat und Rauigkeitsänderung 30 Hz (Frequenzsprung 0 %, 50 % und 100 %) als auch Geräusche mit Frequenzsprung 100 % und Rauigkeitsänderung 10 Hz signifikant früher detektiert als Geräusche ohne AVAS_stat.

Zwischen den Gruppen zeigen sich signifikante Unterschiede. Es zeigt sich, dass die Probanden der Gruppe 1 einige Geräusche im Mittel früher detek-

tierten als die Probanden der Gruppe 2. Tabelle 9 zeigt diese signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen für alle drei Parklücken gemittelt. Dabei sind MD = mittlere Differenz in Sekunden zwischen Gruppe 1 und Gruppe 2 und p = Signifikanz dargestellt.

Die Detektionszeiten sind in Bild 50 für die Gruppen getrennt (Gruppe 1: blaue Kreise, Gruppe 2: grüne Kreise) gemittelt über alle drei Parklücken dargestellt. Die roten Kreise symbolisieren die signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen. Des Weiteren sind die Mediane aller Probanden (schwarzes Quadrat) und die Bewertungen der harmonisierten Geräusche (hellblaues Dreieck) dargestellt.

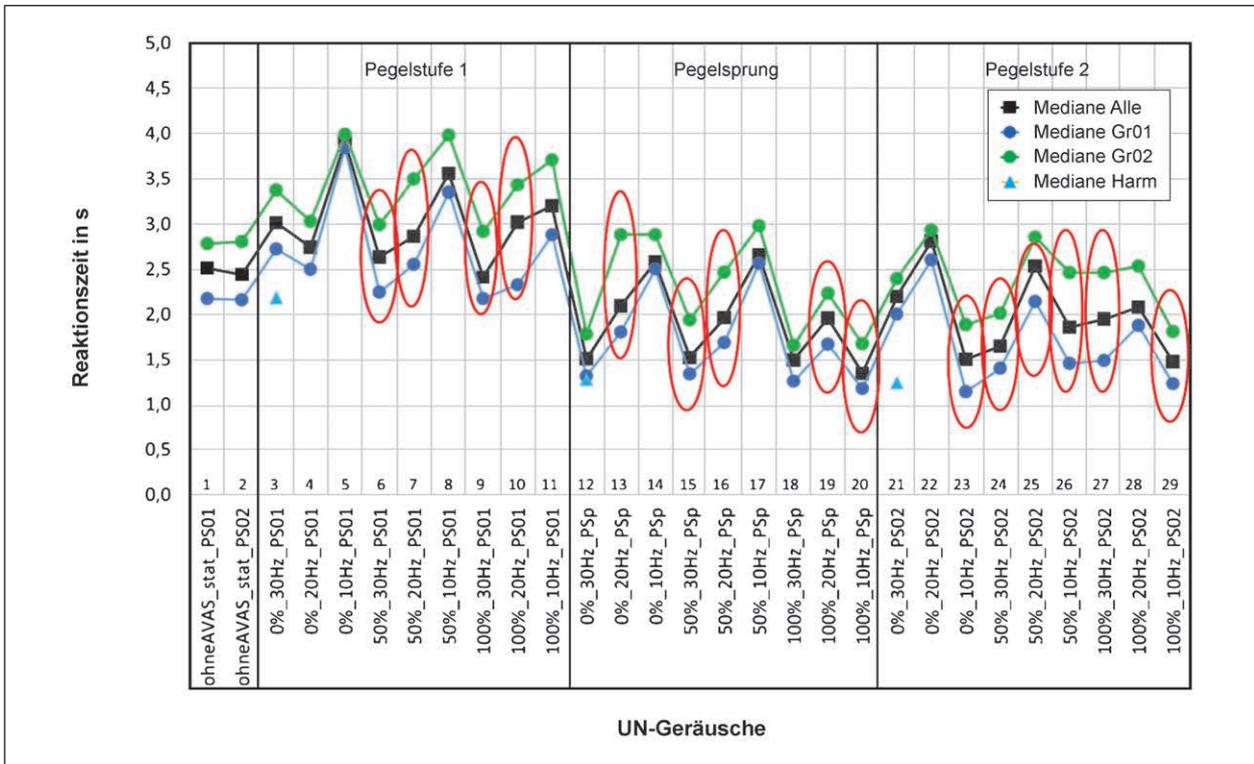


Bild 50: Darstellung der Ergebnisse für die Situation „Parkplatz“ für alle UN-Geräusche – getrennt für die Gruppen

Pegelstufe	Frequenzsprung	Rauigkeitsänderung	MD	p
Pegelstufe 1	50 %	30 Hz	-0,88 s	0,015
		20 Hz	-0,81 s	0,048
	100 %	30 Hz	-0,77 s	0,037
		20 Hz	-0,90 s	0,30
Pegelsprung	0 %	20 Hz	-0,84 s	0,033
		30 Hz	-0,69 s	0,043
	50 %	20 Hz	-0,75 s	0,034
		100 %	20 Hz	-0,90 s
	10 Hz	-0,82 s	0,047	
Pegelstufe 2	0 %	10 Hz	-0,74 s	0,046
		30 Hz	-0,65 s	0,049
		20 Hz	-0,78 s	0,048
	50 %	10 Hz	-0,70 s	0,034
		30 Hz	-1,04 s	0,014
	100 %	10 Hz	-0,73 s	0,046

Tab. 9: Signifikante Unterschiede zwischen Gruppe 1 und Gruppe 2 für die Detektion der UN-Geräusche für die Situation „Parkplatz“ über alle drei Parklücken gemittelt

Die signifikanten Unterschiede für die Parklücken getrennt betrachtet sind im Anhang 2.1 in Tabelle 25 aufgetragen.

Die Reaktionszeiten der UN-Geräusche zeigen keine signifikanten Unterschiede zwischen blinden und sehenden Probanden und auch nicht zwischen weiblichen und männlichen Probanden.

Bild 51 zeigt die Ergebnisse für die US-Geräusche. Es zeigen sich auch hier deutliche Unterschiede zwischen den Pegelstufen. Werden die Ergebnisse der unterschiedlichen Stationär-Geräusch-Parameter miteinander verglichen, zeigen sich in den Detektionszeiten der US-Geräusche folgende signifikante Unterschiede:

- Zwischen den Parklücken (p = 0,017):
 - Geräusche aus der Parklücke 1 wurden signifikant später detektiert als Geräusche aus Parklücke 3 (p = 0,017),
 - Geräusche aus Parklücke 2 wurden signifikant später detektiert als Geräusche aus Parklücke 3 (p < 0,0005).
- Zwischen den Pegelstufen (p < 0,0005):
 - Geräusche mit Pegelstufe 1 wurden signifikant später detektiert als Geräusche mit Pegelsprung (p < 0,0005) oder Pegelstufe 2 (p < 0,0005).
- Zwischen den Frequenzsprüngen (p = 0,001):

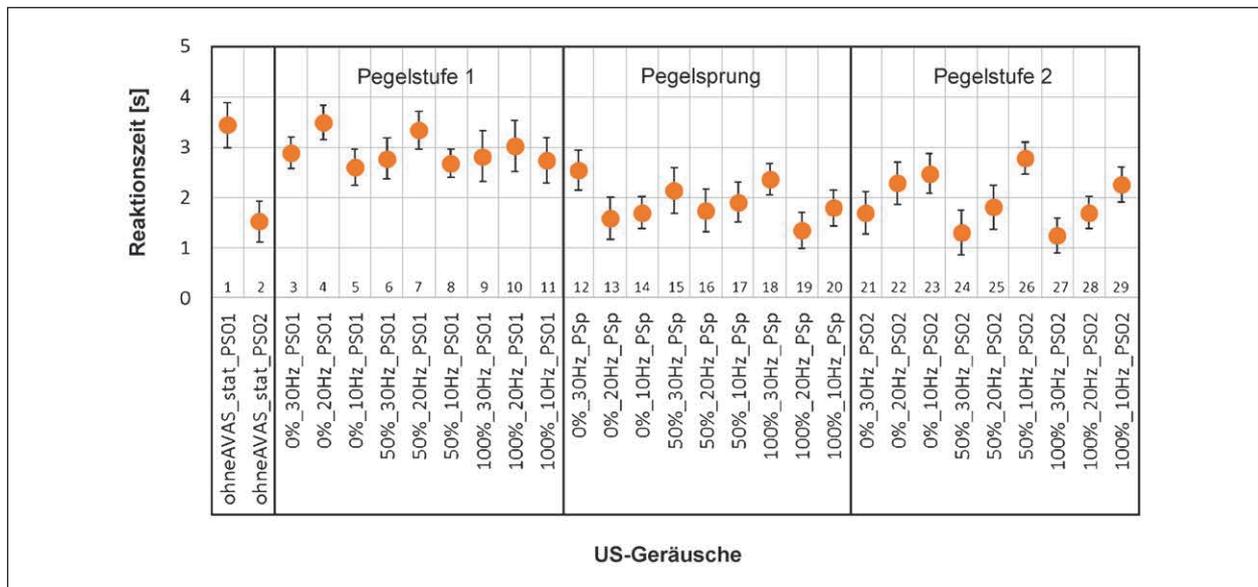


Bild 51: Detektionszeiten für die US-Geräusche für die Situation „Parkplatz“

- Geräusche mit Frequenzsprung 0 % wurden signifikant später detektiert als Geräusche mit Frequenzsprung 50 % ($p = 0,013$) und 100 % ($p = 0,001$).
- Zwischen den Rauigkeitsänderungen ($p = 0,002$):
 - Geräusche mit Rauigkeitsänderung 30 Hz wurden signifikant früher detektiert als Geräusche mit Rauigkeitsänderung 20 Hz ($p = 0,029$) und Rauigkeitsänderung 10 Hz ($p = 0,001$).
- Interaktion Parklücke und Pegel ($p < 0,0005$),
- Interaktion Parklücke und Frequenzsprung ($p = 0,004$),
- Interaktion Parklücke, Pegel und Frequenzsprung ($p = 0,048$),
- Interaktion Pegel und Rauigkeitsänderung ($p < 0,0005$),
- Interaktion Frequenzsprung und Rauigkeitsänderung ($p < 0,0005$),
- Interaktion Pegel, Frequenzsprung und Rauigkeitsänderung ($p = 0,005$),
- Interaktion Parklücke, Pegel, Frequenzsprung und Rauigkeitsänderung ($p = 0,006$).

Der Vergleich der Geräusche mit Stationär-Geräusch mit den jeweiligen Geräuschen des gleichen Pegels ohne AVAS_stat sind in Tabelle 10 aufgezeigt.

Geräusche mit AVAS_stat		Signifikanz
Frequenzsprung 0 %	Rauigkeitsänderung 30 Hz	< 0,0005
	Rauigkeitsänderung 20 Hz	< 0,0005
	Rauigkeitsänderung 10 Hz	0,092
Frequenzsprung 50 %	Rauigkeitsänderung 30 Hz	0,969
	Rauigkeitsänderung 20 Hz	0,048
	Rauigkeitsänderung 10 Hz	0,003
Frequenzsprung 100 %	Rauigkeitsänderung 30 Hz	0,956
	Rauigkeitsänderung 20 Hz	0,434
	Rauigkeitsänderung 10 Hz	0,027

Tab. 10: Paarweise Vergleiche zwischen US-Geräuschen ohne Stationär-Geräusch und den US-Geräuschen mit Stationär-Geräusch und den einzelnen Parametervariationen für die Situation „Parkplatz“

Es zeigt sich, dass Stationär-Geräusche mit Frequenzsprung 0 % und Rauigkeitsänderung 30 Hz und Rauigkeitsänderung 20 Hz, Geräusche mit Frequenzsprung 50 % und Rauigkeitsänderungen 20 Hz und 10 Hz als auch Geräusche mit Frequenzsprung 100 % und Rauigkeitsänderung 10 Hz signifikant später detektiert wurden als Geräusche ohne AVAS_stat.

Zwischen den zwei Gruppen zeigen sich signifikante Unterschiede in den Detektionszeiten der US-Geräusche. Es zeigt sich, dass die Probanden der Gruppe 1 einige Geräusche im Mittel früher detektierten als die Probanden der Gruppe 2. Tabelle 11 zeigt die signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen für alle drei Parklücken gemittelt. Dabei

sind die mittlere Differenz (MD) in Sekunden zwischen Gruppe 1 und Gruppe 2 und die Signifikanz (p) dargestellt. Bild 52 zeigt alle Detektionszeiten der US-Geräusche für die Gruppen getrennt gemittelt über alle Parklücken. Die roten Kreise zeigen die signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen.

Pegelstufe	Frequenzsprung	Rauigkeitsänderung	MD	p
Pegelstufe 1	0 %	10 Hz	-0,73 s	0,034
Pegelsprung	50 %	30 Hz	-0,86 s	0,031
		20 Hz	-0,65 s	0,045
	100 %	20 Hz	-0,87 s	0,034
		10 Hz	-0,75 s	0,049
Pegelstufe 2	0 %	20 Hz	-0,71 s	0,037
		10 Hz	-1,04 s	0,014
	50 %	20 Hz	-0,77 s	0,043
		10 Hz	-0,73 s	0,045
	100 %	20 Hz	-0,79 s	0,034

Tab. 11: Signifikante Unterschiede zwischen Gruppe 1 und Gruppe 2 für die Detektion der US-Geräusche für die Situation „Parkplatz“ über alle drei Parklücken gemittelt

Die signifikanten Unterschiede für die Parklücken getrennt betrachtet sind im Anhang in Tabelle 25 aufgetragen.

Die Reaktionszeiten der US-Geräusche zeigen signifikanten Unterschiede zwischen blinden und sehenden Probanden bei dem Geräusch Pegelstufe 1, Frequenzsprung 100 % und Rauigkeitsänderung 20 Hz aus Parklücke 1. Es zeigt sich, dass die sehenden Personen diesen Stimulus im Mittel 0,86 s später detektierten als die blinden Probanden (p = 0,049).

Zwischen den männlichen und weiblichen Probanden zeigen sich keine signifikanten Unterschiede in den Detektionszeiten der US-Geräusche bei der Situation Parkplatz.

Bestimmung der Ortungsfehler

Neben der Reaktion sollten die Probanden ebenfalls die Ausgangsposition des ausparkenden Fahrzeugs bestimmen. Dabei hatten die Probanden die Auswahl von Position 1 (Fahrzeug ganz links) bis Position 6 (Fahrzeug ganz rechts). Die Ortungsfeh-

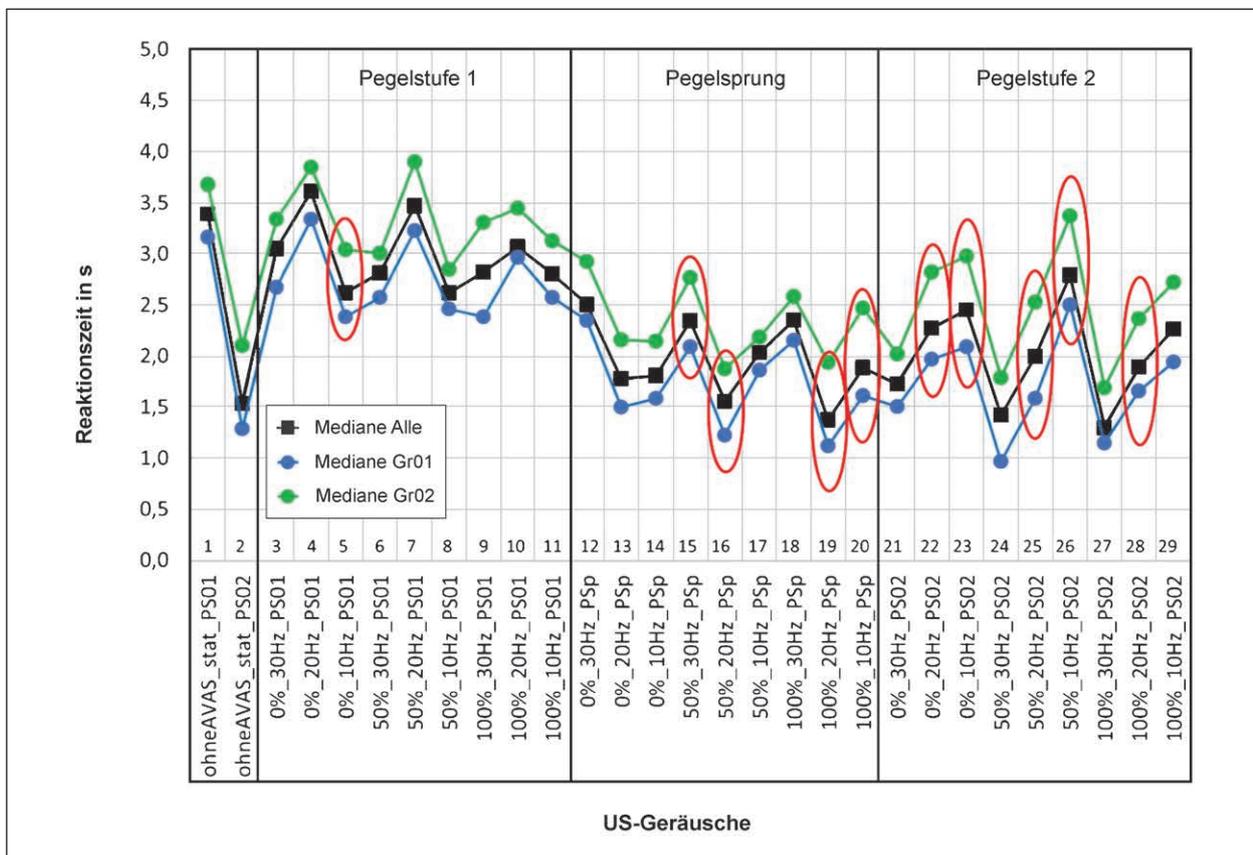


Bild 52: Darstellung der Ergebnisse für die Situation „Parkplatz“ für alle US-Geräusche – getrennt für die Gruppen

ler für UN-Geräusche in Abhängigkeit der Parklücken sind in Bild 53 dargestellt.

Es zeigen sich einige signifikante Unterschiede in der Ortung der UN-Geräusche. Werden die Ergebnisse der unterschiedlichen Stationär-Geräusch-Parameter miteinander verglichen, zeigen sich in den gemittelten Ortungsfehlern der UN-Geräusche folgende signifikante Unterschiede:

- Zwischen den Parklücken ($p = 0,002$):
 - Geräusche aus der Parklücke 1 weisen einen signifikant kleinen Ortungsfehler auf als Geräusche aus Parklücke 3 ($p = 0,019$),
 - Geräusche aus Parklücke 2 weisen einen signifikant kleinen Ortungsfehler auf als Geräusche aus Parklücke 3 ($p = 0,002$).
- Zwischen den Pegelstufen ($p = 0,024$):
 - Geräusche mit Pegelstufe 1 weisen einen signifikant größeren Ortungsfehler auf als Geräusche mit Pegelsprung ($p = 0,014$) oder Geräusche mit Pegelstufe 2 ($p = 0,048$).
- Interaktion Parklücke, Frequenzsprung und Rauigkeitsänderung ($p = 0,002$).

Der Vergleich der Geräusche mit Stationär-Geräusch mit den jeweiligen Geräuschen des gleichen Pegels ohne AVAS_stat sind in Tabelle 12 aufgezeigt.

Es zeigt sich, dass Stationär-Geräusche im Mittel mit Frequenzsprung 0 % und Rauigkeitsänderung 20 Hz, Geräusche mit Frequenzsprung 50 % und

Geräusche mit AVAS_stat		Signifikanz
Frequenzsprung 0 %	Rauigkeitsänderung 30 Hz	0,500
	Rauigkeitsänderung 20 Hz	0,027
	Rauigkeitsänderung 10 Hz	0,150
Frequenzsprung 50 %	Rauigkeitsänderung 30 Hz	0,040
	Rauigkeitsänderung 20 Hz	0,060
	Rauigkeitsänderung 10 Hz	0,168
Frequenzsprung 100 %	Rauigkeitsänderung 30 Hz	0,031
	Rauigkeitsänderung 20 Hz	0,006
	Rauigkeitsänderung 10 Hz	0,151

Tab. 12: Paarweise Vergleiche der Ortungsfehler zwischen UN-Geräuschen ohne Stationär-Geräusch und den UN-Geräuschen mit Stationär-Geräusch und den einzelnen Parametervariationen für die Situation „Parkplatz“

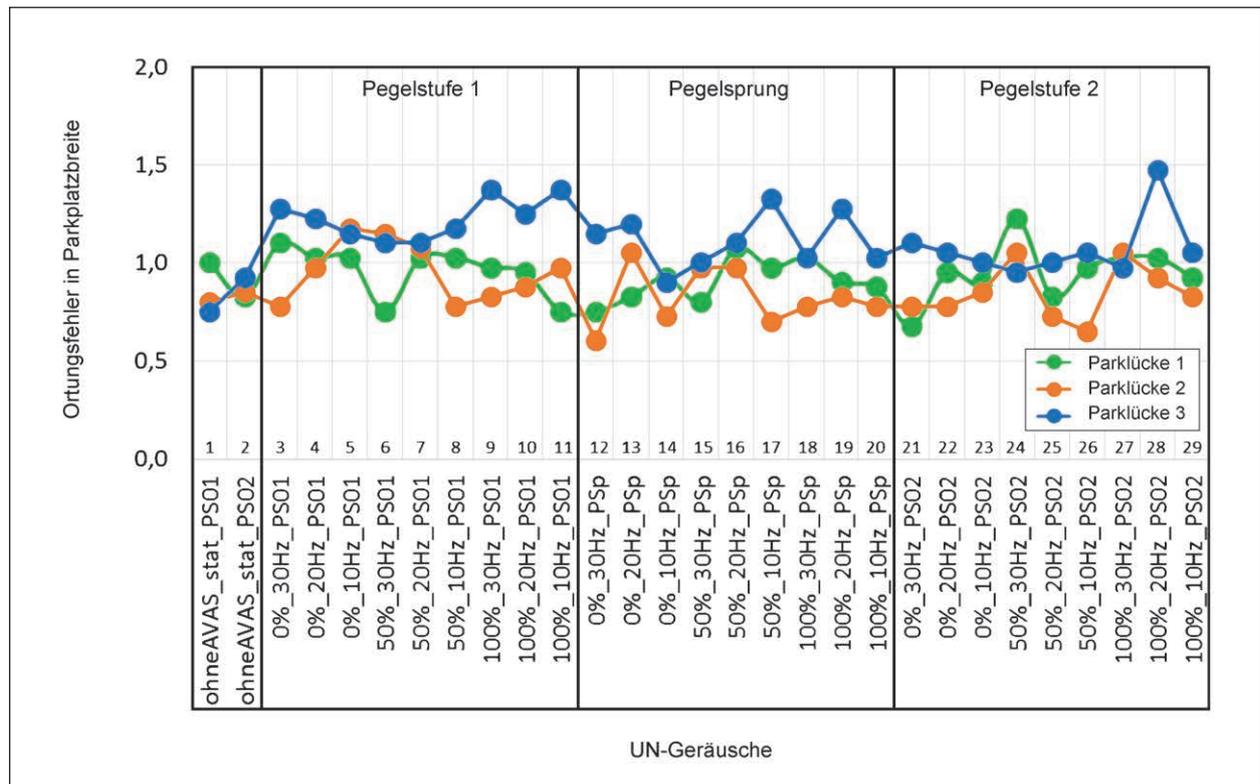


Bild 53: Ortungsfehler der UN-Geräusche in Abhängigkeit der Parklücken: Parklücke 1: grün, Parklücke 2: orange, Parklücke 3: blau

Rauigkeitsänderung 30 Hz als auch Geräusche mit Frequenzsprung 100 % und Rauigkeitsänderungen 30 Hz und 20 Hz signifikant größere Ortungsfehler aufweisen als Geräusche ohne AVAS_stat.

Auch bei der Ortungsfähigkeit wurden die Ergebnisse auf signifikante Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Gruppen (Gruppe, Blind/Sehend, Geschlecht) über alle drei Parklücken gemittelt untersucht.

Zwischen den zwei Gruppen zeigt sich ein signifikanter Unterschied in den Ortungsfehlern der UN-Geräusche. Es zeigt sich, dass die Probanden der Gruppe 1 im Mittel einen signifikant größeren Ortungsfehler bei dem Geräusch mit Pegelstufe 1, Frequenzsprung 0 % und Rauigkeitsänderung 30 Hz aufwiesen als die Probanden der Gruppe 2 ($p = 0,037$). Dies ist das Geräusch, welches den Probanden aus Gruppe 1 in einem Vorexperiment als harmonisiertes Geräusch präsentiert wurde.

Bei dem Geräusch mit Pegelsprung, Frequenzsprung 50 % und einer Rauigkeitsänderung von 20 Hz hatten die sehenden Probanden einen signifikant größeren Ortungsfehler als die blinden und sehbeeinträchtigten Probanden ($p = 0,024$). Auch zwischen den Geschlechtern zeigt sich ein signifikanter Unterschied der Ortungsfehler. So wiesen die

Bewertungen der weiblichen Probanden einen signifikant höheren Ortungsfehler bei der Bewertung des Geräusches mit Pegelstufe 2, Frequenzsprung 50 % und Rauigkeitsänderung 10 Hz auf im Vergleich zu den männlichen Probanden ($p = 0,049$).

Die signifikanten Unterschiede für die Parklücken getrennt betrachtet sind im Anhang in Tabelle 27 und Tabelle 28 aufgetragen.

Die Ortungsfehler für US-Geräusche in Abhängigkeit der Parklücken sind in Bild 54 dargestellt.

Es zeigen sich einige signifikante Unterschiede in der Ortung der US-Geräusche. Werden die Ergebnisse der unterschiedlichen Stationär-Geräusch-Parameter miteinander verglichen, zeigen sich in den Ortungsfehlern der US-Geräusche folgende signifikante Unterschiede:

- Zwischen den Parklücken ($p = 0,005$):
 - Geräusche aus Parklücke 2 weisen einen signifikant kleinen Ortungsfehler auf als Geräusche aus Parklücke 3 ($p = 0,002$).
- Interaktion Parklücke und Rauigkeitsänderung ($p = 0,027$),
- Interaktion Frequenzsprung und Rauigkeitsänderung ($p = 0,016$).

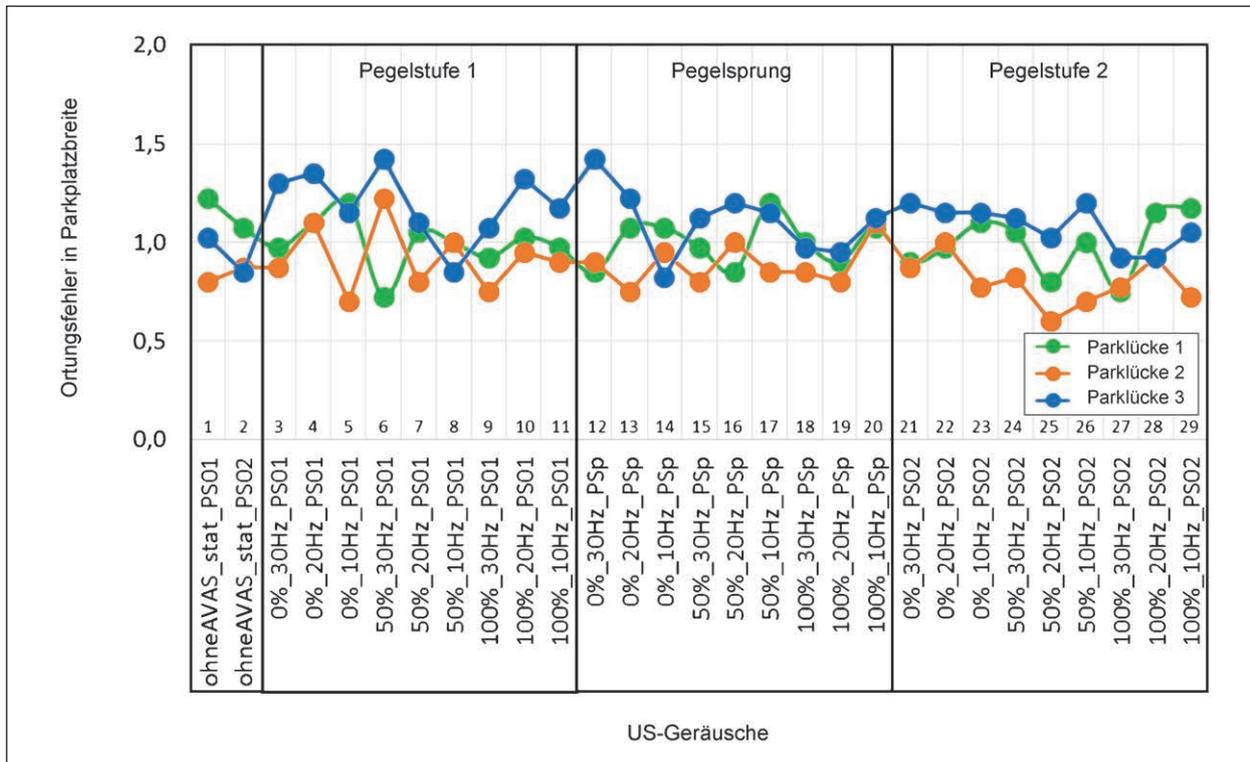


Bild 54: Ortungsfehler der US-Geräusche in Abhängigkeit der Parklücken: Parklücke 1: grün, Parklücke 2: orange, Parklücke 3: blau

Der Vergleich der Geräusche mit Stationär-Geräusch mit den jeweiligen Geräuschen des gleichen Pegels ohne AVAS_stat sind in Tabelle 13 aufgeführt.

Es zeigt sich, dass es keine signifikanten Unterschiede in der Ortung zwischen US-Geräusche mit Stationär-Geräusch und ohne Stationär-Geräusch gibt.

Auch bei der Ortungsfähigkeit wurden die Ergebnisse auf signifikante Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Gruppen (Gruppe, Blind/Sehend, Geschlecht) über alle drei Parklücken gemittelt untersucht: Zwischen den zwei Gruppen zeigt sich kein signifikanter Unterschied in den Ortungsfehlern der US-Geräusche. Es zeigt sich, dass die sehenden Probanden der im Mittel einen signifikant größeren Ortungsfehler bei dem Geräusch mit Pegelstufe 2, Frequenzsprung 100 % und Rauigkeitsänderung 30 Hz aufwiesen als die blinden Probanden ($p = 0,013$).

Bei den Geräuschen mit Pegelstufe 2, Frequenzsprung 50 % und einer Rauigkeitsänderung von 10 Hz ($p = 0,034$) und Pegelstufe 2, Frequenzsprung 100 % und Rauigkeitsänderung 30 Hz ($p = 0,041$) hatten die weiblichen Probanden einen signifikant größeren Ortungsfehler als die männlichen Probanden.

Die signifikanten Unterschiede für die Parklücken getrennt betrachtet sind im Anhang in Tabelle 29, Tabelle 30 und Tabelle 31 aufgetragen.

Geräusche mit AVAS_stat		Signifikanz
Frequenzsprung 0 %	Rauigkeitsänderung 30 Hz	0,364
	Rauigkeitsänderung 20 Hz	0,157
	Rauigkeitsänderung 10 Hz	0,681
Frequenzsprung 50 %	Rauigkeitsänderung 30 Hz	0,321
	Rauigkeitsänderung 20 Hz	0,745
	Rauigkeitsänderung 10 Hz	0,696
Frequenzsprung 100 %	Rauigkeitsänderung 30 Hz	0,336
	Rauigkeitsänderung 20 Hz	0,661
	Rauigkeitsänderung 10 Hz	0,336

Tab. 13: Paarweise Vergleiche der Ortungsfehler zwischen US-Geräuschen ohne Stationär-Geräusch und den US-Geräuschen mit Stationär-Geräusch und den einzelnen Parametervariationen für die Situation „Parkplatz“

5.6.6 Kreuzung (Situation 3)

Für die Kreuzungssituation musste die Ortungswahrnehmung über einen großen Winkelbereich, insbesondere auch für Positionen hinter dem Fußgänger, untersucht werden. Hier spielt die Abstrahlcharakteristik des AVAS in Verbindung mit seiner Einbaumgebung eine wesentliche Rolle.

Versuchsbeschreibung

In der Kreuzungssituation wurde primär die Ortbarkeit von Anfahrvorgängen mit und ohne Stationär-Geräusch untersucht. Aufgrund der langen Dauer der Hörversuche wurden einige der zu untersuchenden Winkel in der Kreuzungssituation zusammengefasst, um das Ungleichgewicht zwischen der Bestimmung der Ortbarkeit und der Reaktionszeitmessung zu optimieren. Durch die spiegelsymmetrische Anordnung ist die Hälfte der Winkel redundant, sodass die Ortbarkeit in der aktualisierten Versuchsplanung nur für sechs statt zwölf Winkel untersucht wurde. Im Hörversuch wurde im ersten Schritt die Reaktionszeit aufgezeichnet und danach die Frage nach der Hörrichtung analog der Uhrzeit beantwortet (vgl. Bild 55).

Ergebnisse Reaktionszeiten

Die Reaktionszeiten für die Situation „Kreuzung“ sind für die UN-Geräusche gemittelt über alle Uhr-

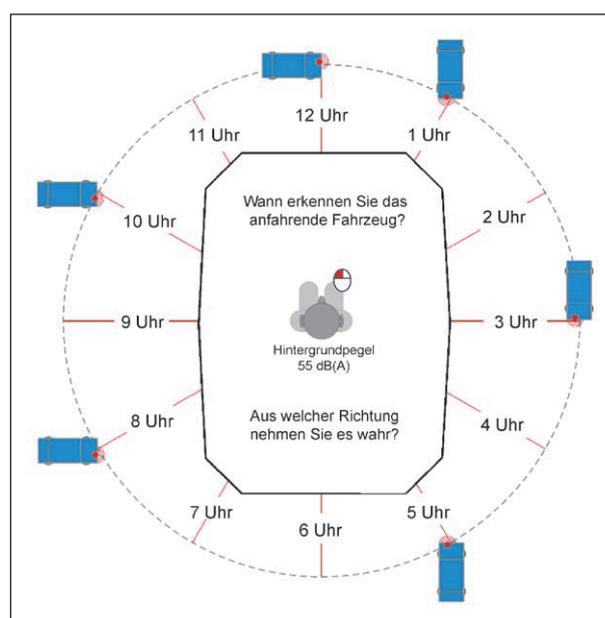


Bild 55: Sinnbildliche Darstellung der Befragung nach der wahrgenommenen Richtung im Hörversuch

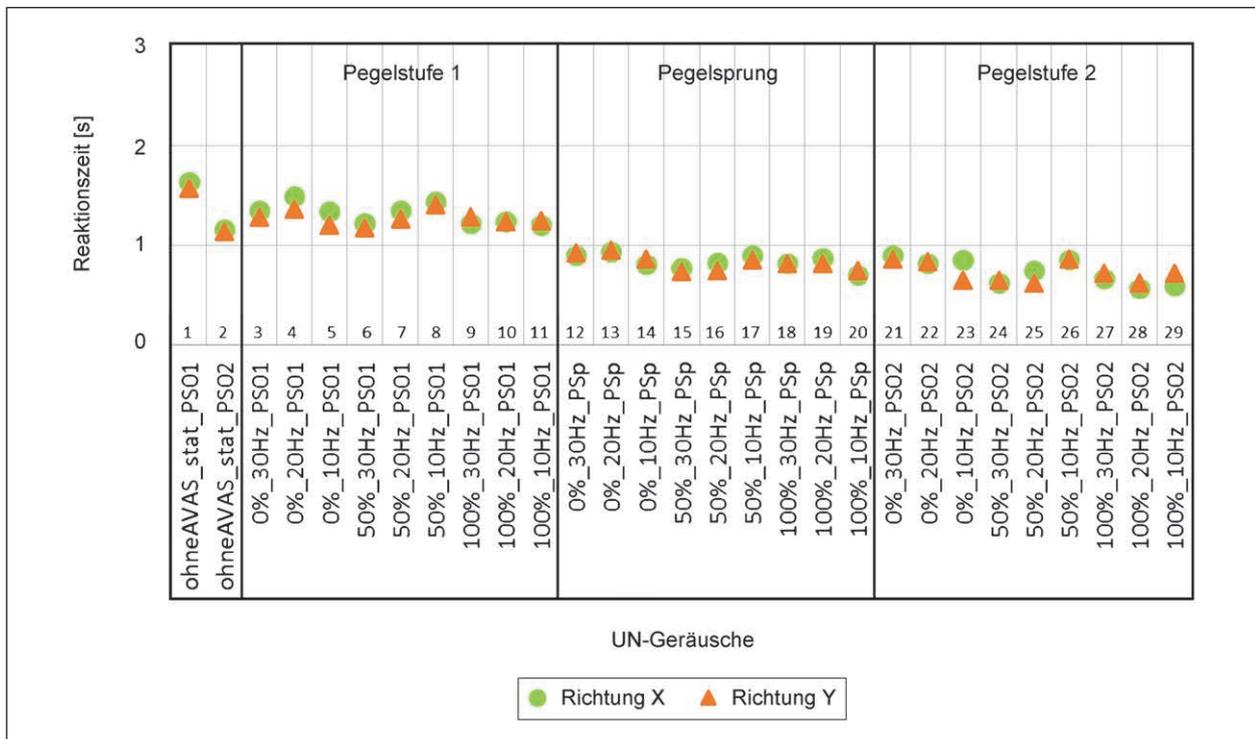


Bild 56: Detektionszeiten für die UN-Geräusche für die Situation „Kreuzung“ gemittelt über alle Uhrzeiten, getrennt für die zwei Fahrrichtungen X und Y

zeiten in Bild 56 aufgetragen, da sich zwischen den Parklücken keine signifikanten Unterschiede zeigen.

Werden die Ergebnisse der unterschiedlichen Stationär-Geräusch-Parameter miteinander verglichen, zeigen sich in den Detektionszeiten der UN-Geräusche folgende signifikante Unterschiede:

- Zwischen Richtung X und Y ($p < 0,0005$):
 - Geräusche aus Richtung X wurden signifikant früher detektiert als Geräusche aus Richtung Y ($p < 0,0005$).
- Zwischen den 360° Richtungen (Uhrzeiten) ($p < 0,0005$):
 - Geräusche von 1 Uhr wurden: signifikant früher detektiert als Geräusche von 10 Uhr und 12 Uhr ($p < 0,0005$),
 - Geräusche von 3 Uhr wurden: signifikant früher detektiert als Geräusche von 1, 8, 10 und 12 Uhr ($p < 0,0005$),
 - Geräusche von 5 Uhr wurden: signifikant früher detektiert als Geräusche von 1, 8 10 und 12 Uhr ($p < 0,0005$),
- Geräusche von 8 Uhr wurden: signifikant früher detektiert als Geräusche von 10 und 12 Uhr ($p < 0,0005$).
- Zwischen den Pegelstufen ($p < 0,0005$):
 - Geräusche mit Pegelstufe 2 wurden signifikant früher detektiert als Geräusche mit Pegelstufe 1 ($p < 0,0005$) und Pegelsprung ($p < 0,0005$),
 - Geräusche mit Pegelsprung wurden signifikant früher detektiert als Geräusche mit Pegelstufe 1 ($p < 0,0005$).
- Zwischen den Frequenzsprüngen ($p < 0,0005$):
 - Geräusche mit Frequenzsprung 100 % wurden signifikant früher detektiert als Geräusche mit Frequenzsprung 50 % ($p < 0,0005$) und 0 % ($p < 0,0005$).
- Zwischen den Rauigkeitsänderungen ($p = 0,044$):
 - Geräusche mit Rauigkeitsänderung 30 Hz wurden signifikant früher detektiert als Geräusche mit Rauigkeitsänderung 20 Hz ($p = 0,013$).
- Interaktion Richtung und Uhrzeit ($p < 0,0005$),

- Interaktion Richtung und Pegel ($p < 0,0005$),
- Interaktion Uhrzeit und Pegel ($p < 0,0005$),
- Interaktion Richtung, Uhrzeit und Pegel ($0,000$),
- Interaktion Richtung und Frequenzsprung ($p = 0,007$),
- Interaktion Uhrzeit und Frequenzsprung ($p = 0,029$),
- Interaktion Richtung, Uhrzeit und Frequenzsprung ($p < 0,0005$),
- Interaktion Pegel und Frequenzsprung ($p = 0,003$),
- Interaktion Uhrzeit, Pegel, Frequenzsprung ($p < 0,0005$),
- Interaktion Uhrzeit und Rauigkeitsänderung ($p < 0,0005$),
- Interaktion Richtung, Uhrzeit und Rauigkeitsänderung ($p < 0,0005$),
- Interaktion Richtung, Uhrzeit, Pegel, Rauigkeitsänderung ($p = 0,008$),
- Interaktion Frequenzsprung und Rauigkeitsänderung ($p < 0,0005$),
- Interaktion Uhrzeit, Frequenzsprung, Rauigkeitsänderung ($p = 0,025$),
- Interaktion Richtung, Uhrzeit, Frequenzsprung und Rauigkeitsänderung ($p = 0,002$),
- Interaktion Uhrzeit, Pegel, Frequenzsprung und Rauigkeitsänderung ($p = 0,034$),
- Interaktion Richtung, Uhrzeit, Pegel, Frequenzsprung und Rauigkeitsänderung ($p < 0,0005$).

In einem zweiten Schritt wurden die Geräusche mit Stationär-Geräusch mit den jeweiligen Geräuschen des gleichen Pegels aber ohne AVAS_stat miteinander verglichen. Anhand der Tabelle 14 zeigt sich, dass alle Geräusche mit Stationär-Geräusche signifikant früher detektiert wurden als die Geräusche ohne AVAS_stat.

Werden die Reaktionszeiten über alle Uhrzeiten und über beide Richtungen gemittelt, zeigen sich zwischen den Gruppen signifikante Unterschiede. Es zeigt sich, dass die Probanden der Gruppe 1 das Geräusch mit Pegelstufe 2, Frequenzsprung 50 % und Rauigkeitsänderung 20 Hz ($MD = 0,46$ s, $p = 0,044$) als auch das Geräusch mit Pegelstufe 2,

Frequenzsprung 100 % und Rauigkeitsänderung 10 Hz ($MD = 0,44$ s, $p = 0,037$) im Mittel über alle Uhrzeiten und Richtungen hinweg früher detektierten als die Probanden der Gruppe 2. Die Reaktionszeiten der UN-Geräusche zeigen keine signifikanten Unterschiede zwischen blinden und sehenden Probanden und auch nicht zwischen den männlichen und weiblichen Probanden.

Die Detektionszeiten sind in Bild 57 für die Uhrzeiten getrennt und nur für die X-Fahrtrichtung dargestellt. Einige Reaktionszeiten weisen Werte unter null auf. Dies ist damit zu erklären, dass einige Probanden früher reagierten, sodass das Fahrzeug noch stand.

Die signifikanten Unterschiede für die Uhrzeiten getrennt betrachtet sind im Anhang 3.1 in Tabelle 32 bis Tabelle 35 aufgetragen.

Die Reaktionszeiten für die Situation „Kreuzung“ sind für die US-Geräusche gemittelt über alle Uhrzeiten in Bild 58 aufgetragen, da sich zwischen den Parklücken keine signifikanten Unterschiede zeigen.

Werden die Ergebnisse der unterschiedlichen Stationär-Geräusch-Parameter miteinander verglichen, zeigen sich in den Detektionszeiten der US-Geräusche folgende signifikante Unterschiede:

- Zwischen Richtung X und Y ($p < 0,0005$)
 - Geräusche aus Richtung X wurden signifikant früher detektiert als Geräusche aus Richtung Y ($p < 0,0005$).

Geräusche mit AVAS_stat		Signifikanz
Frequenzsprung 0 %	Rauigkeitsänderung 30 Hz	< 0,0005
	Rauigkeitsänderung 20 Hz	< 0,0005
	Rauigkeitsänderung 10 Hz	< 0,0005
Frequenzsprung 50 %	Rauigkeitsänderung 30 Hz	< 0,0005
	Rauigkeitsänderung 20 Hz	< 0,0005
	Rauigkeitsänderung 10 Hz	< 0,0005
Frequenzsprung 100 %	Rauigkeitsänderung 30 Hz	< 0,0005
	Rauigkeitsänderung 20 Hz	< 0,0005
	Rauigkeitsänderung 10 Hz	< 0,0005

Tab. 14: Paarweise Vergleiche zwischen UN-Geräuschen ohne Stationär-Geräusch und den UN-Geräuschen mit Stationär-Geräusch und den einzelnen Parametervariationen für die Situation „Kreuzung“

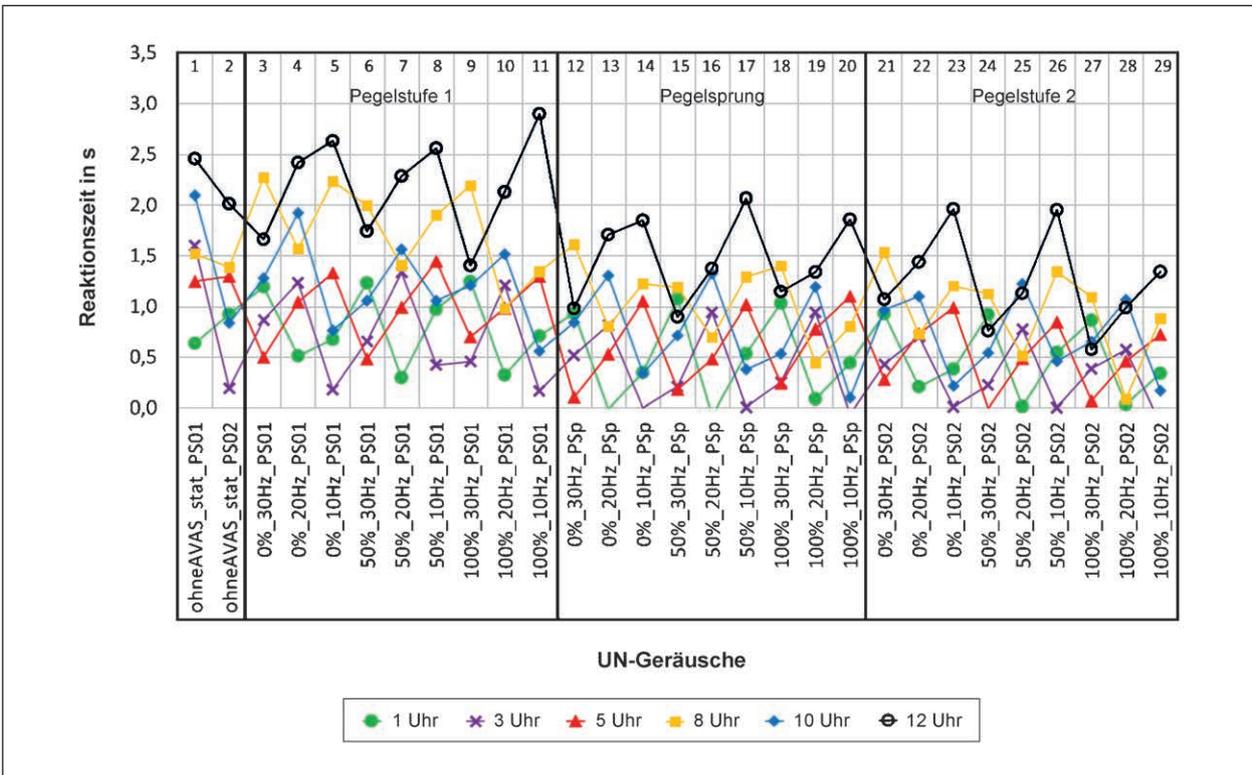


Bild 57: Darstellung der Ergebnisse für die Situation „Kreuzung“ für alle UN-Geräusche aus X-Richtung – getrennt für die Uhrzeiten

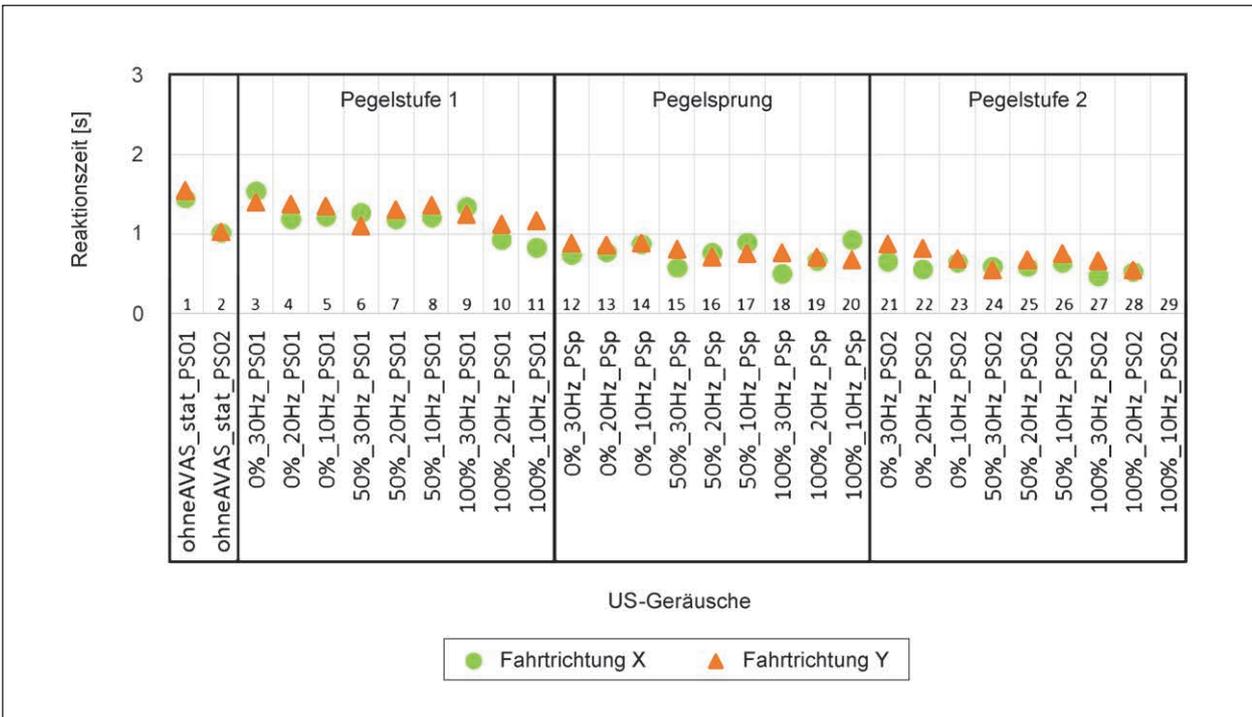


Bild 58: Detektionszeiten für die US-Geräusche für die Situation „Kreuzung“ gemittelt über alle Uhrzeiten, getrennt für die zwei Fahrtrichtungen X und Y

- Zwischen den Uhrzeiten ($p < 0,0005$):
 - Geräusche von 1 Uhr wurden: signifikant früher detektiert als Geräusche von 10 Uhr und 12 Uhr ($p < 0,0005$),
 - Geräusche von 3 Uhr wurden: signifikant früher detektiert als Geräusche von 1, 8, 10 und 12 Uhr ($p < 0,0005$),
 - Geräusche von 5 Uhr wurden: signifikant früher detektiert als Geräusche von 1, 8 10 und 12 Uhr ($p < 0,0005$),
 - Geräusche von 8 Uhr wurden: signifikant früher detektiert als Geräusche von 10 und 12 Uhr ($p < 0,0005$).
- Zwischen den Pegelstufen ($p < 0,0005$):
 - Geräusche mit Pegelsprung und Pegelstufe 2 wurden signifikant früher detektiert als Geräusche mit Pegelstufe 1 ($p < 0,0005$),
 - Geräusche mit Pegelstufe 2 wurden signifikant früher detektiert als Geräusche mit Pegelsprung ($p < 0,0005$).
- Zwischen den Frequenzsprüngen ($p < 0,0005$):
 - Geräusche mit Frequenzsprung 50 % und 100 % wurden signifikant früher detektiert als Geräusche mit Frequenzsprung 0 % ($p < 0,0005$),
 - Geräusche mit Frequenzsprung 100 % wurden signifikant früher detektiert als Geräusche mit Frequenzsprung 50 % ($p = 0,001$).
- Zwischen den Rauigkeitsänderungen ($p = 0,041$):
 - Geräusche mit Rauigkeitsänderung 20 Hz wurden signifikant früher detektiert als Geräusche mit Rauigkeitsänderung 10 Hz ($p = 0,022$).
- Interaktion Richtung und Uhrzeit ($p < 0,0005$),
- Interaktion Richtung und Pegel ($p < 0,0005$),
- Interaktion Uhrzeit und Pegel ($p < 0,0005$),
- Interaktion Richtung, Uhrzeit und Pegel ($p < 0,0005$),
- Interaktion Uhrzeit und Frequenzsprung ($p = 0,026$),
- Interaktion Richtung, Uhrzeit und Frequenzsprung ($p < 0,0005$),

- Interaktion Pegel und Frequenzsprung ($p = 0,006$),
- Interaktion Uhrzeit und Rauigkeitsänderung ($p < 0,0005$),
- Interaktion Uhrzeit, Pegel, Rauigkeitsänderung ($p = 0,045$),
- Interaktion Frequenzsprung und Rauigkeitsänderung ($p < 0,0005$),
- Interaktion Pegel, Frequenzsprung und Rauigkeitsänderung ($p = 0,002$).

In einem zweiten Schritt wurden die Geräusche mit Stationär-Geräusch mit den jeweiligen Geräuschen des gleichen Pegels aber ohne AVAS_stat miteinander verglichen. Anhand der Tabelle 15 zeigt sich, dass alle Geräusche mit Stationär-Geräusch signifikant früher detektiert wurden als die Geräusche ohne AVAS_stat.

Werden die Reaktionszeiten über alle Uhrzeiten und über beide Richtungen gemittelt, zeigen sich zwischen den Gruppen, zwischen Blinden und Sehenden und zwischen männlichen und weiblichen Probanden keine signifikanten Unterschiede.

Die Detektionszeiten sind in Bild 59 für die Uhrzeiten getrennt und nur für die X-Fahrtrichtung dargestellt. Die signifikanten Unterschiede für die Uhrzeiten getrennt betrachtet sind im Anhang 3.1 in Tabelle 35, Tabelle 36 und Tabelle 37 aufgetragen.

Geräusche mit AVAS_stat		Signifikanz
Frequenzsprung 0 %	Rauigkeitsänderung 30 Hz	< 0,0005
	Rauigkeitsänderung 20 Hz	< 0,0005
	Rauigkeitsänderung 10 Hz	< 0,0005
Frequenzsprung 50 %	Rauigkeitsänderung 30 Hz	< 0,0005
	Rauigkeitsänderung 20 Hz	< 0,0005
	Rauigkeitsänderung 10 Hz	< 0,0005
Frequenzsprung 100 %	Rauigkeitsänderung 30 Hz	< 0,0005
	Rauigkeitsänderung 20 Hz	< 0,0005
	Rauigkeitsänderung 10 Hz	< 0,0005

Tab. 15: Paarweise Vergleiche zwischen US-Geräuschen ohne Stationär-Geräusch und den US-Geräuschen mit Stationär-Geräusch und den einzelnen Parametervariationen für die Situation „Kreuzung“

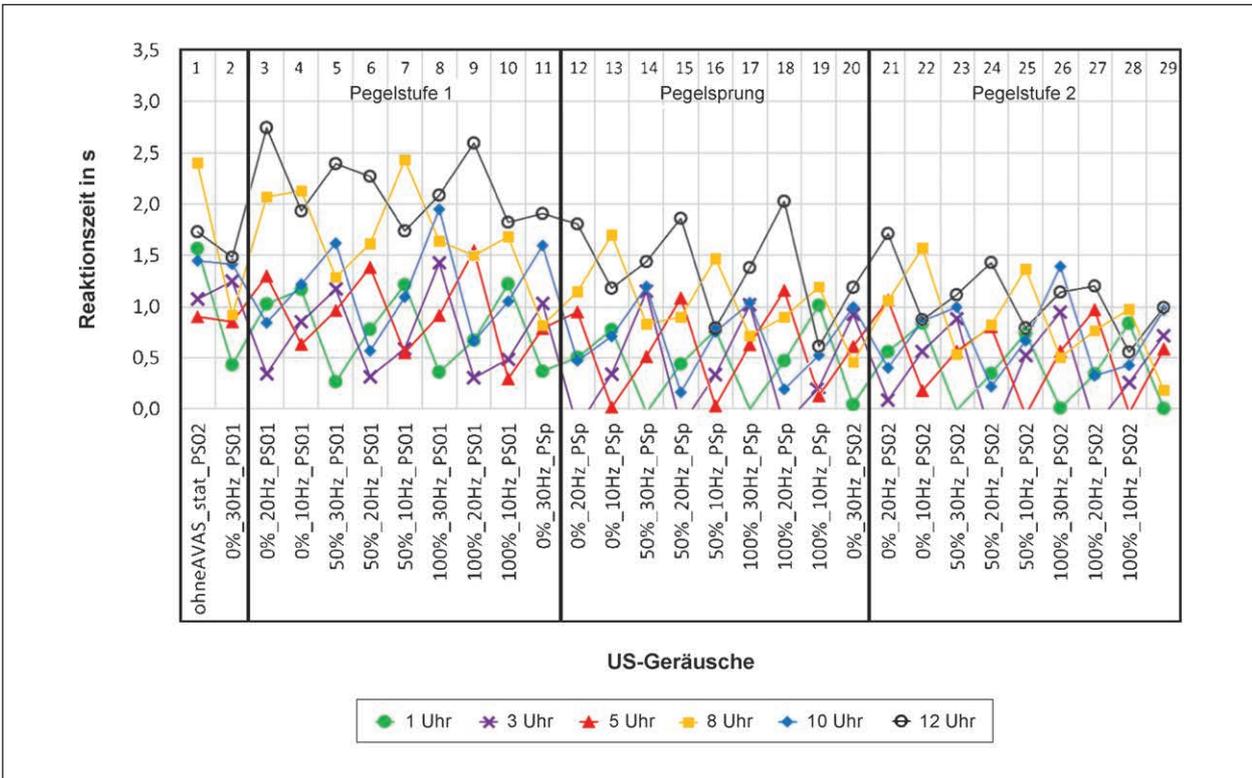


Bild 59: Darstellung der Ergebnisse für die Situation „Kreuzung“ für alle US-Geräusche aus X-Richtung – getrennt für die Uhrzeiten

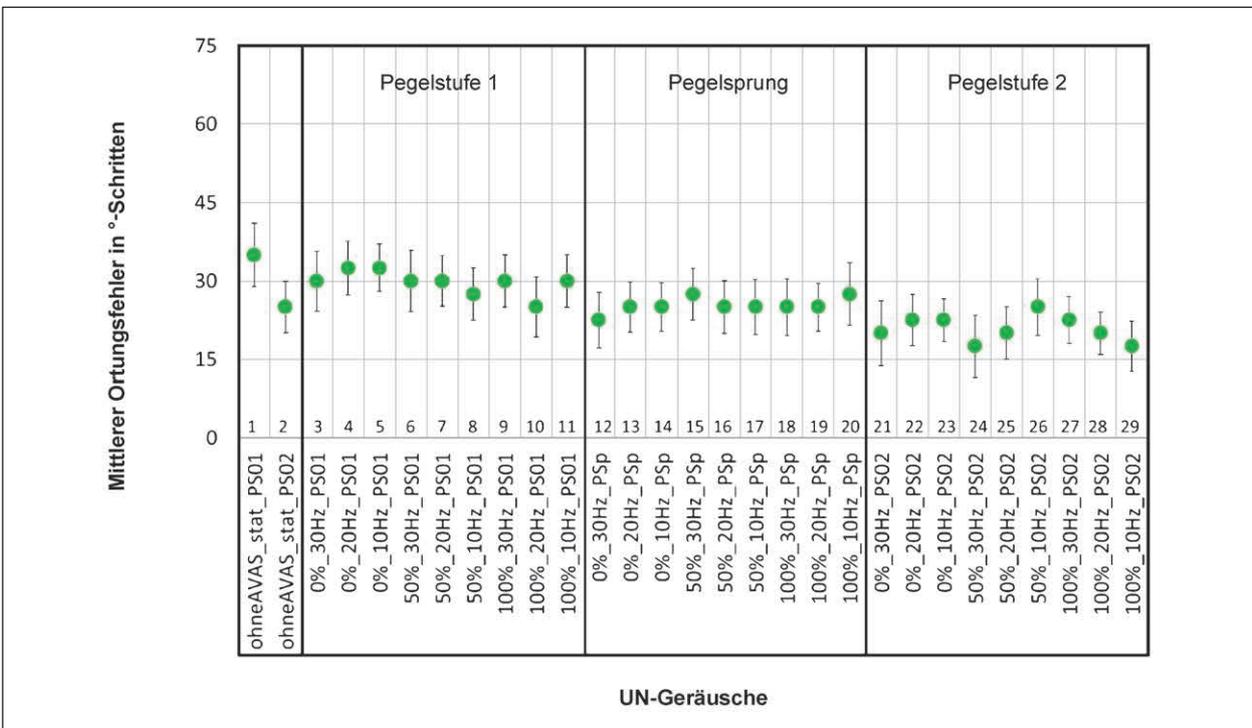


Bild 60: Darstellung der Ortungsfehler in °-Schritten für die Situation „Kreuzung“ für alle UN-Geräusche aus X-Richtung – über alle Uhrzeiten gemittelt

Bestimmung der Ortungsfehler

Auch bei der Situation „Kreuzung“ wurden die Probanden gebeten neben der Reaktion ebenfalls die Ausgangsposition des anfahrenden Fahrzeugs zu bestimmen. Dabei hatten die Probanden die Auswahl von Position 1 (Fahrzeug auf 1 Uhr) bis Position 12 (Fahrzeug auf 12 Uhr) entsprechend den Uhrzeiten einer Uhr. Die Ortungsfehler für UN-Geräusche über alle Uhrzeiten gemittelt sind in Bild 60 dargestellt.

Werden die Ergebnisse der unterschiedlichen Stationär-Geräusch-Parameter miteinander verglichen, zeigen sich in den Ortungsfehlern der UN-Geräusche folgende signifikante Unterschiede:

- Zwischen den Pegelstufen ($p < 0,0005$):
 - Geräusche mit Pegelstufe 1 wiesen einen signifikant größeren Ortungsfehler auf als Geräusche mit Pegelsprung ($p < 0,0005$) oder Geräusche mit Pegelstufe 2 ($p < 0,0005$),
 - Geräusche mit Pegelstufe 2 wiesen einen signifikant kleineren Ortungsfehler aus als Geräusche mit einem Pegelsprung ($p < 0,0005$).
- Interaktion Frequenzsprung und Rauigkeitsänderung ($p = 0,030$).

Der Vergleich der Geräusche mit Stationär-Geräusch mit den jeweiligen Geräuschen des gleichen Pegels ohne AVAS_stat sind in Tabelle 16 aufgezeigt.

Geräusche mit AVAS_stat		Signifikanz
Frequenzsprung 0 %	Rauigkeitsänderung 30 Hz	0,147
	Rauigkeitsänderung 20 Hz	0,173
	Rauigkeitsänderung 10 Hz	0,113
Frequenzsprung 50 %	Rauigkeitsänderung 30 Hz	0,024
	Rauigkeitsänderung 20 Hz	0,015
	Rauigkeitsänderung 10 Hz	0,257
Frequenzsprung 100 %	Rauigkeitsänderung 30 Hz	0,069
	Rauigkeitsänderung 20 Hz	0,003
	Rauigkeitsänderung 10 Hz	0,030

Tab. 16: Paarweise Vergleiche der Ortungsfehler zwischen UN-Geräuschen ohne Stationär-Geräusch und den UN-Geräuschen mit Stationär-Geräusch und den einzelnen Parametervariationen für die Situation „Kreuzung“

Es zeigt sich, dass Stationär-Geräusche mit Frequenzsprung 50 % und Rauigkeitsänderung 30 Hz und 20 Hz als auch Geräusche mit Frequenzsprung 100 % und Rauigkeitsänderung 20 Hz und 10 Hz signifikant kleinere Ortungsfehler als Geräusche ohne Stationär-Geräusche aufwiesen.

Auch bei der Ortungsfähigkeit wurden die Ergebnisse auf signifikante Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Gruppen (Gruppe, Blind/Sehend, Geschlecht) über alle Uhrzeiten gemittelt untersucht: Zwischen den zwei Gruppen und den Geschlechtern zeigen sich keine signifikanten Unterschiede in den Ortungsfehlern der UN-Geräusche. Es zeigt sich, dass die blinden und sehbeeinträchtigten Probanden im Mittel einen signifikant größeren Ortungsfehler bei dem Geräusch mit Pegelstufe 2, Frequenzsprung 0 % und Rauigkeitsänderung 20 Hz aufwiesen als die sehenden Probanden ($p = 0,037$).

Die signifikanten Unterschiede für die Uhrzeiten getrennt betrachtet sind im Anhang 3.2 in Tabelle 38, Tabelle 39 und Tabelle 40 aufgetragen.

Die Ortungsfehler für US-Geräusche in Abhängigkeit der Uhrzeit sind in Bild 61 dargestellt.

Werden die Ergebnisse der unterschiedlichen Stationär-Geräusch-Parameter miteinander verglichen, zeigen sich in den Ortungsfehlern der US-Geräusche folgende signifikante Unterschiede:

- Zwischen den Pegelstufen ($p < 0,0005$):
 - Geräusche mit Pegelsprung und Pegelstufe 2 wiesen einen signifikant kleineren Ortungsfehler auf als Geräusche mit Pegelstufe 1 ($p < 0,0005$),
 - Geräusche mit Pegelstufe 2 wiesen einen signifikant kleineren Ortungsfehler auf als Geräusche mit Pegelsprung ($p < 0,0005$).

Der Vergleich der Geräusche mit Stationär-Geräusch mit den jeweiligen Geräuschen des gleichen Pegels ohne AVAS_stat sind in Tabelle 17 aufgezeigt.

Es zeigt sich, dass Stationär-Geräusche mit Frequenzsprung 0 % und Rauigkeitsänderung 10 Hz, Geräusche mit Frequenzsprung 50 % und Rauigkeitsänderung 30 Hz und 20 Hz und auch Geräusche mit Frequenzsprung 100 % und Rauigkeitsänderung 30 Hz, 20 Hz und 10 Hz einen signifikant

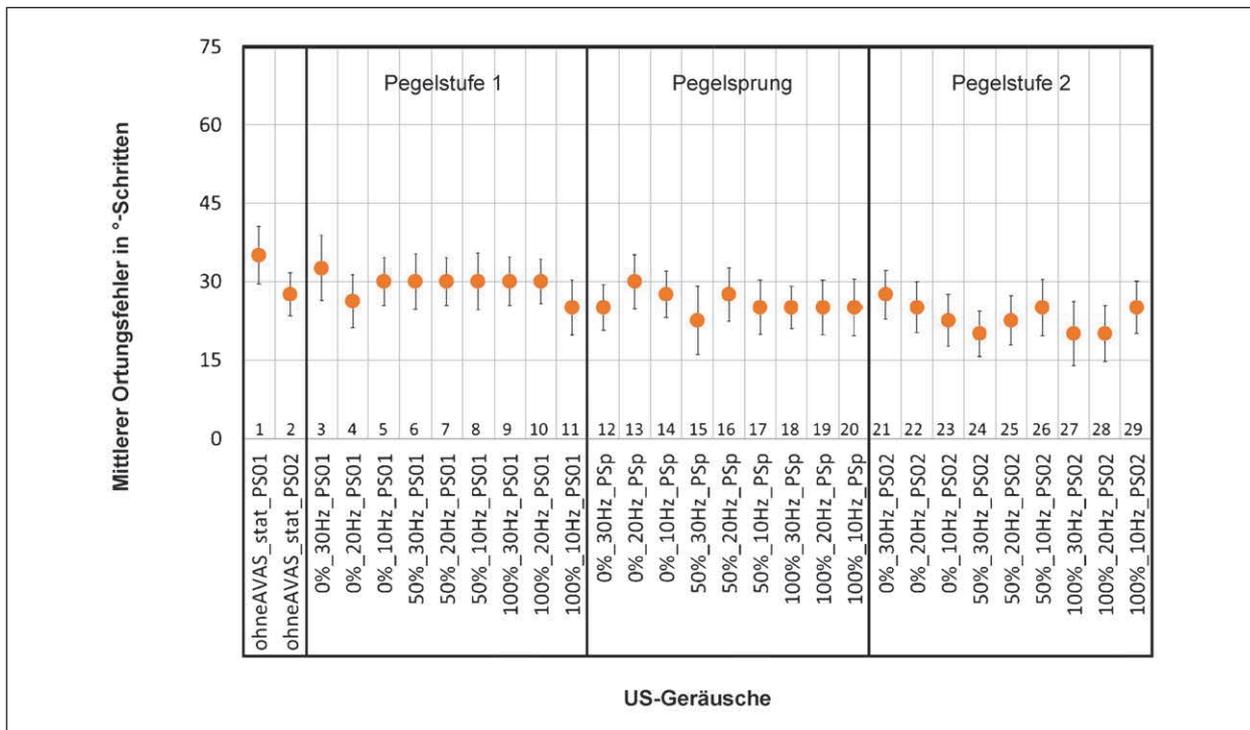


Bild 61: Darstellung der Ortungsfehler in °-Schritten für die Situation „Kreuzung“ für alle US-Geräusche aus X-Richtung – über alle Uhrzeiten gemittelt

Geräusche mit AVAS_stat		Signifikanz
Frequenzsprung 0 %	Rauigkeitsänderung 30 Hz	0,166
	Rauigkeitsänderung 20 Hz	0,060
	Rauigkeitsänderung 10 Hz	0,010
Frequenzsprung 50 %	Rauigkeitsänderung 30 Hz	0,010
	Rauigkeitsänderung 20 Hz	0,001
	Rauigkeitsänderung 10 Hz	0,532
Frequenzsprung 100 %	Rauigkeitsänderung 30 Hz	0,008
	Rauigkeitsänderung 20 Hz	0,009
	Rauigkeitsänderung 10 Hz	0,021

Tab. 17: Paarweise Vergleiche der Ortungsfehler zwischen US-Geräuschen ohne Stationär-Geräusch und den US-Geräuschen mit Stationär-Geräusch und den einzelnen Parametervariationen für die Situation „Kreuzung“

kleineren Ortungsfehler aufwiesen als Geräusche ohne AVAS_stat.

Auch bei der Ortungsfähigkeit wurden die Ergebnisse auf signifikante Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Gruppen (Gruppe, Blind/Sehend, Geschlecht) über alle Uhrzeiten gemittelt untersucht: Zwischen den zwei Gruppen und den blinden/sehenden Probanden zeigen sich keine signifikanten Unterschiede in den Ortungsfehlern der

US-Geräusche. Es zeigt sich, dass die weiblichen Probanden im Mittel einen signifikant größeren Ortungsfehler bei dem Geräusch mit Pegelstufe 1, Frequenzsprung 50 % und Rauigkeitsänderung 20 Hz aufwiesen als die männlichen Probanden ($p = 0,042$).

Die signifikanten Unterschiede für die Uhrzeiten getrennt betrachtet sind im Anhang 3.2 in Tabelle 41, Tabelle 42 und Tabelle 43 aufgetragen.

5.6.7 Lästigkeit

Zur alleinigen Sicherstellung der Wahrnehmbarkeit würde es ausreichen für ein Zusatzgeräusch einen sehr hohen Pegel festzulegen. Dies verringert allerdings die Akzeptanz der Anwohner und Passanten. Daher sollte ein Kompromiss aus Erkennbarkeit und Lästigkeit gefunden werden. Diesbezüglich wurden die Variationen der Stationär-Geräusche ebenfalls hinsichtlich der Lästigkeit in einem Wahrnehmungsversuch untersucht.

Stimuli für den Hörversuch

Aus den Kombinationen aus Stationär-Geräusch und Fahrgeräusch der vorherigen Reaktionszeitexperimente werden jeweils einige Sekunden ge-

schnitten. Um die Ergebnisse der Lästigkeit nicht durch die Reaktionszeit- und Ortungsversuche zu beeinflussen, wurden die Lästigkeitsuntersuchungen zusammen mit der Hörschwellenmessungen in einem ersten Versuch durchgeführt.

Versuchsbeschreibung

Für jede Kombination (Stationär-Geräusch und Fahrgeräusch) soll die Lästigkeit bewertet werden. Die Bewertung der Lästigkeit erfolgte mittels einer Rohrmanuskala mit verbalen Anker (nicht lästig, wenig lästig, mittel lästig, ziemlich lästig, sehr lästig) (siehe Bild 62). Die Bewertungen waren dabei unabhängig von der jeweiligen Situation. Die Proban-

Bewerten Sie die Ausprägung folgender Eigenschaften!

Wiedergabe

lästig

nicht wenig mittel ziemlich sehr

1

von 4

Block 1

Bewerten

Bild 62: Versuchsoberfläche für die Lästigkeitsbewertung

den bewerteten alle Stationär-Geräusche allein und auch den Übergang von Stationär-Geräusch zu Fahrgeräusch. Die Benutzeroberfläche (Bild 62) wurde ebenfalls als Matlab-GUI implementiert.

Ergebnisse

Die Ergebnisse für die Lästigkeitsbewertungen der reinen Stationär-Geräusche sind in den Bild 63 und Bild 64 dargestellt.

Werden die Ergebnisse der unterschiedlichen Stationär-Geräusch-Parameter miteinander verglichen, zeigen sich in den Lästigkeitsbewertungen der reinen Stationär-Geräusche der UN-Geräusche folgende signifikante Unterschiede:

- Zwischen den Pegelstufen ($p < 0,0005$):
 - Geräusche mit Pegelstufe 1 wurden signifikant weniger lästig bewertet als Geräusche mit Pegelstufe 2 ($p < 0,0005$),
 - Geräusche mit Pegelsprung weniger signifikant weniger lästig bewertet als Geräusche mit Pegelstufe 2 ($p < 0,0005$).
- Zwischen den Frequenzsprüngen ($p < 0,0005$):
 - Geräusche mit Frequenzsprung 50 % wurden signifikant weniger lästig bewertet als Geräusche mit Frequenzsprung 0 % ($p = 0,001$),

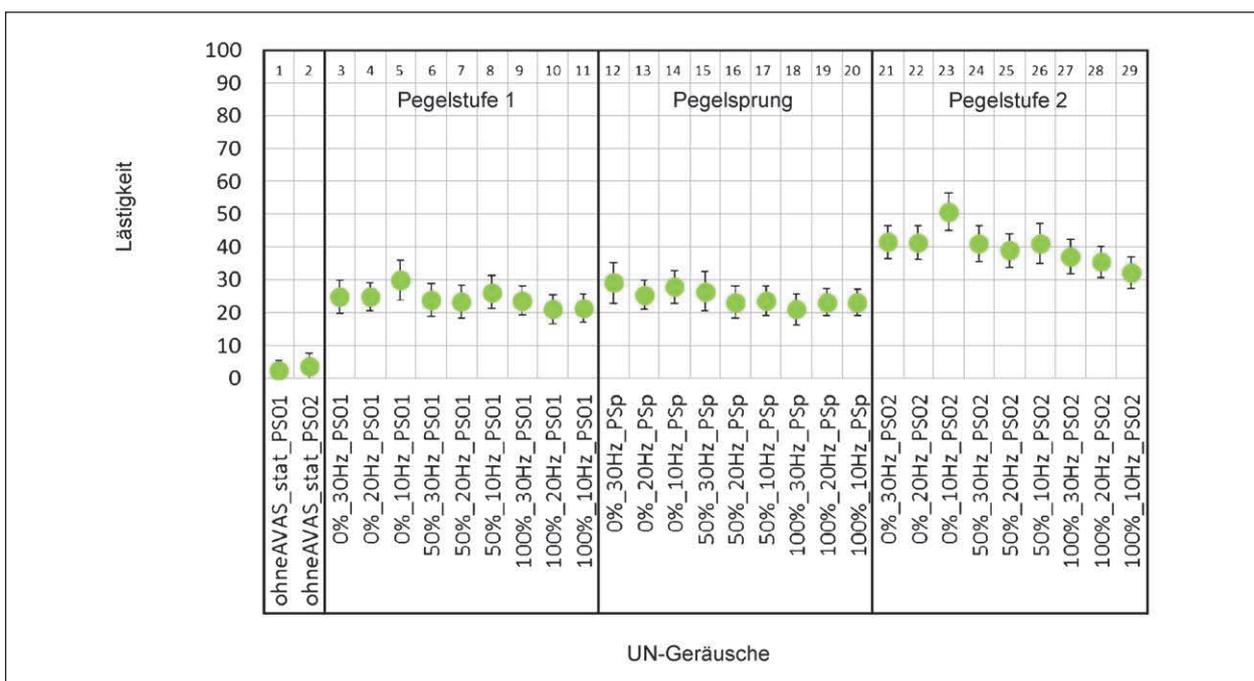


Bild 63: Lästigkeitsbewertungen der UN-Stationär-Geräusche ohne Fahrgeräusch

- Geräusche mit Frequenzsprung 100 % wurden signifikant weniger lästig bewertet als Geräusche mit Frequenzsprung 0 % ($p < 0,0005$) und 50 % ($p = 0,001$).
- Interaktion Frequenzsprünge und Rauigkeitsänderung ($p = 0,006$).

Im Mittel zeigen die unterschiedlichen Rauigkeitsänderungen keinen signifikanten Einfluss. Im paarweisen Vergleich zeigt sich, dass Geräusche mit Rauigkeitsänderung 20 Hz als signifikant weniger lästig bewertet wurden als Geräusche mit Rauigkeitsänderung 10 Hz ($p = 0,010$).

Die Lästigkeitsbewertungen zeigen zwischen den Gruppen und zwischen den Geschlechtern keine signifikanten Unterschiede. Es zeigt sich, dass die blinden Probanden das Geräusch mit Pegelstufe 1, Frequenzsprung 50 % und Rauigkeitsänderung 10 Hz signifikant weniger lästig bewertet haben als die sehenden Probanden ($p = 0,046$).

Bild 64 zeigt die Ergebnisse der Lästigkeitsbewertungen der US-Geräusche.

Ebenfalls wurden die Ergebnisse der unterschiedlichen Stationär-Geräusch-Parameter miteinander verglichen. Dabei zeigen sich in den Lästigkeitsbewertungen der reinen Stationär-Geräusche der UN-Geräusche folgende signifikante Unterschiede:

- Zwischen den Pegelstufen ($p < 0,0005$)
 - Geräusche mit Pegelstufe 1 sind signifikant weniger lästig als Geräusche mit Pegelstufe 2 ($p < 0,0005$),
 - Geräusche mit Pegelsprung sind signifikant weniger lästig als Geräusche mit Pegelstufe 2 ($p < 0,0005$).
- Zwischen den Frequenzsprüngen ($p < 0,0005$)
 - Geräusche mit Frequenzsprung 50 % sind signifikant weniger lästig als Geräusche mit Frequenzsprung 0 % ($p < 0,0005$),
 - Geräusche mit Frequenzsprung 100 % sind signifikant weniger lästig als Geräusche mit Frequenzsprung 0 % ($p < 0,0005$).

Die Lästigkeitsbewertungen zeigen zwischen den Gruppen und zwischen den blinden und sehenden Probanden keine signifikanten Unterschiede. Es zeigt sich, dass die weiblichen Probanden das Geräusch mit Pegelstufe 2, Frequenzsprung 50 % und Rauigkeitsänderung 20 Hz signifikant lästiger bewertet haben als die männlichen Probanden ($p = 0,018$).

In einem zweiten Teil bewerteten die Probanden die kompletten Geräusche aus Stationär-Geräusch und Fahrgeräusch, um eine Aussage über den jeweiligen Übergang treffen zu können. Die Ergebnisse sind in Bild 65 und Bild 66 aufgetragen.

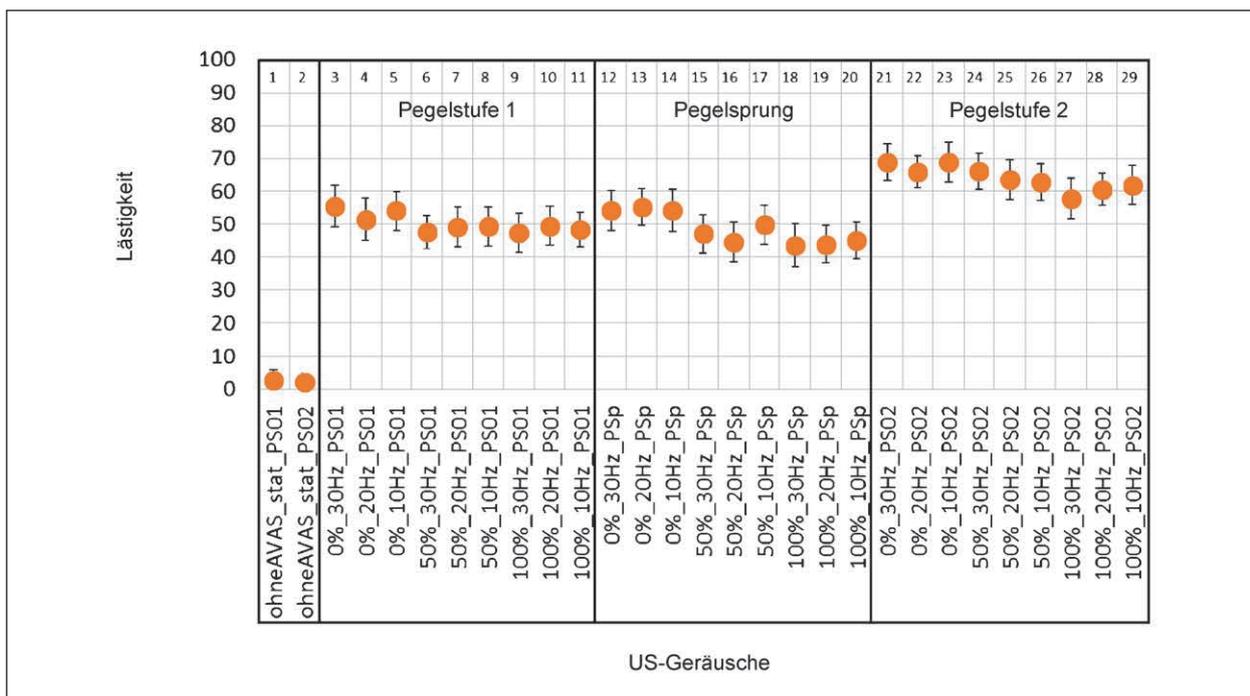


Bild 64: Lästigkeitsbewertungen der US-Stationär-Geräusche ohne Fahrgeräusche

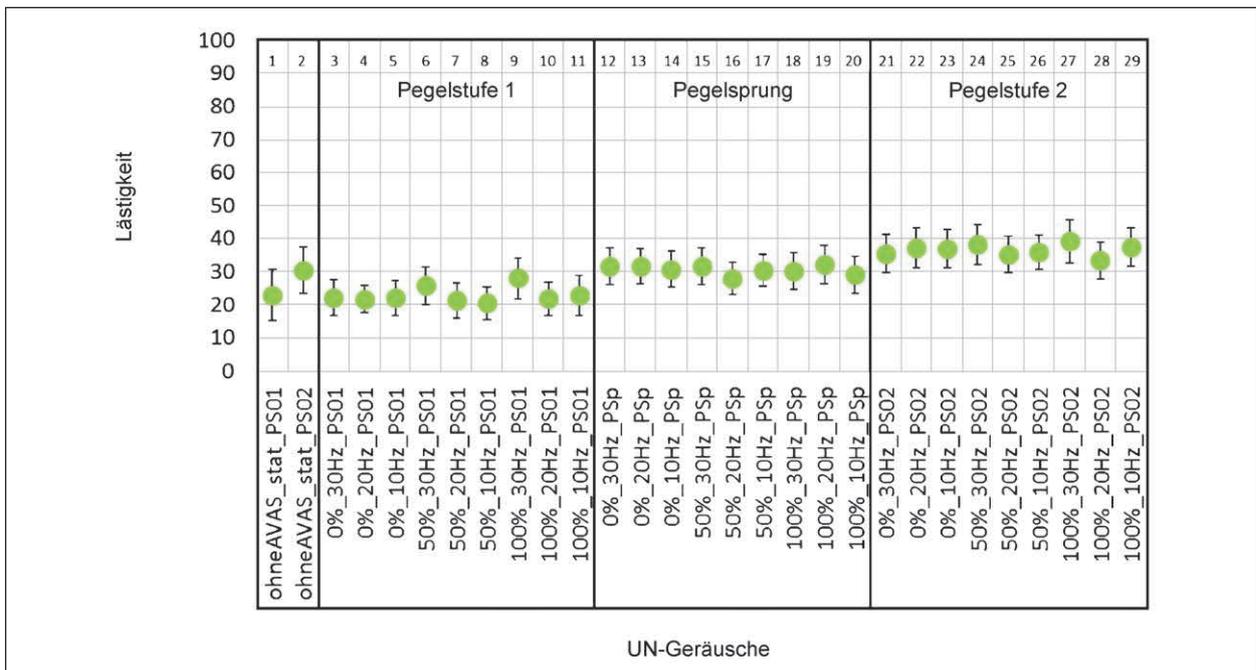


Bild 65: Lästigkeitsbewertungen der UN-Stationär-Geräusche und Fahrgeräusch

Die Ergebnisse der UN-Geräusche zeigen folgende signifikante Unterschiede:

- Zwischen den Pegelstufen ($p < 0,0005$)
 - Geräusche mit Pegelstufe 1 wurden als signifikant weniger lästig bewertet als Geräusche mit Pegelsprung ($p < 0,0005$) und Pegelstufe 2 ($p < 0,0005$),
 - Geräusche mit Pegelsprung wurden als signifikant weniger lästig bewertet als Geräusche mit Pegelstufe 2 ($p < 0,0005$).

Im Mittel zeigen die unterschiedlichen Rauigkeitsänderungen keinen signifikanten Einfluss. Im paarweisen Vergleich zeigt sich, dass Geräusche mit Rauigkeitsänderung 20 Hz signifikant weniger lästig sind als Geräusche mit Rauigkeitsänderung 30 Hz ($p = 0,015$).

Der Vergleich der UN-Geräusche mit Stationär-Geräusch mit den jeweiligen Geräuschen des gleichen Pegels ohne AVAS_stat sind in Tabelle 18 aufgeführt.

Generell zeigt sich, kein signifikanter Unterschied zwischen den UN-Geräuschen mit und ohne-Stationär-Geräusch. Die einzelnen Paarvergleiche für alle Geräusche befinden sich im Anhang 4.

Die Lästigkeitsbewertungen zeigen zwischen den Gruppen und zwischen den Geschlechtern keine signifikanten Unterschiede. Es zeigt sich, dass die

Geräusche mit AVAS_stat		Signifikanz
Frequenzsprung 0 %	Rauigkeitsänderung 30 Hz	0,572
	Rauigkeitsänderung 20 Hz	0,557
	Rauigkeitsänderung 10 Hz	0,600
Frequenzsprung 50 %	Rauigkeitsänderung 30 Hz	0,235
	Rauigkeitsänderung 20 Hz	0,941
	Rauigkeitsänderung 10 Hz	0,791
Frequenzsprung 100 %	Rauigkeitsänderung 30 Hz	0,238
	Rauigkeitsänderung 20 Hz	0,740
	Rauigkeitsänderung 10 Hz	0,628

Tab. 18: Paarweise Vergleiche der Ortungsfehler zwischen UN-Geräuschen ohne Stationär-Geräusch und den UN-Geräuschen mit Stationär-Geräusch und den einzelnen Parametervariationen für die Situation „Kreuzung“

blinden Probanden das Geräusch mit Pegelstufe 2, Frequenzsprung 50 % und Rauigkeitsänderung 20 Hz signifikant weniger lästig bewertet haben als die sehenden Probanden ($p = 0,015$).

Die Ergebnisse der zweiten Lästigkeitsbewertungen der US-Geräusche sind in Bild 66 aufgetragen.

Die Ergebnisse der US-Geräusche zeigen folgende signifikante Unterschiede:

- Zwischen den Pegelstufen ($p < 0,0005$):
 - Geräusche mit Pegelstufe 1 wurden als signifikant weniger lästig bewertet als Geräusche

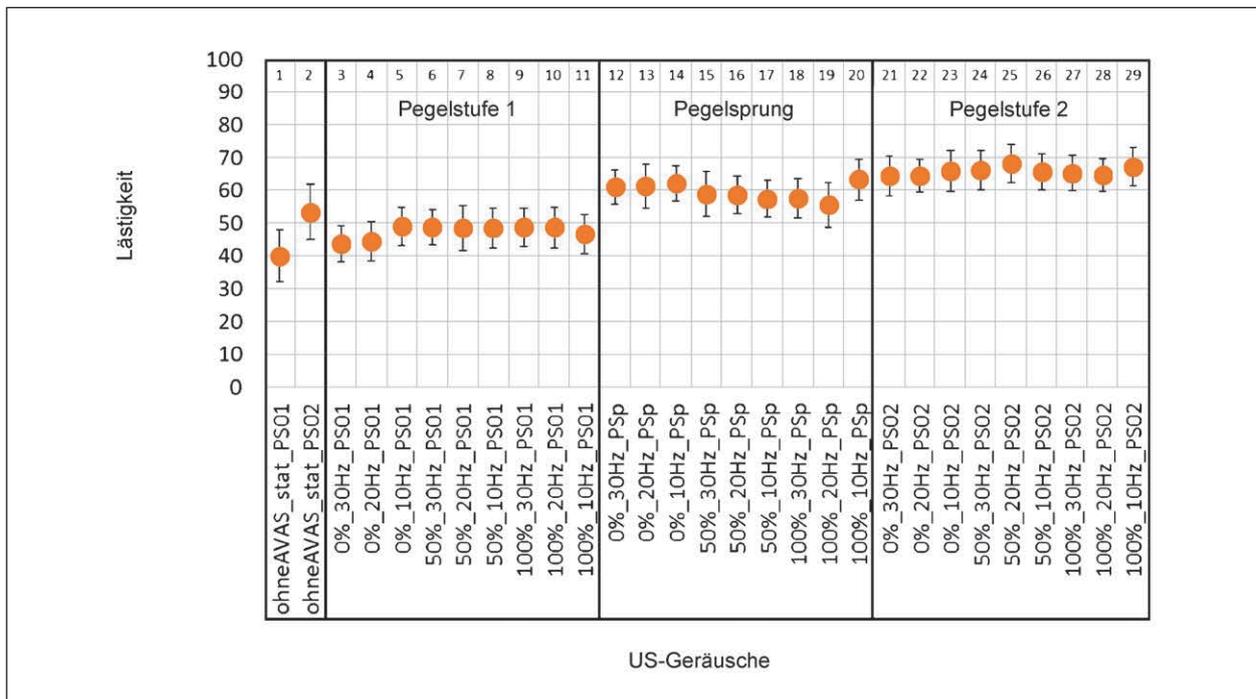


Bild 66: Lästigkeitsbewertungen der US-Stationär-Geräusche und Fahrgeräusch

mit Pegelsprung ($p < 0,0005$) und Pegelstufe 2 ($p < 0,0005$),

- Geräusche mit Pegelsprung wurden signifikant weniger lästig bewertet als Geräusche mit Pegelstufe 2 ($p < 0,0005$).
- Interaktion Pegel und Frequenzsprung ($p = 0,038$).

Der Vergleich der US-Geräusche mit Stationär-Geräusch mit den jeweiligen Geräuschen des gleichen Pegels ohne AVAS_stat sind in Tabelle 19 aufzeigt.

Anhand dieser Tabelle zeigt sich, dass Geräusche mit Frequenzsprung 0 % und Rauigkeitsänderungen 20 Hz und 10 Hz und Geräusche mit Frequenzsprung 50 % und Rauigkeitsänderungen 30 Hz, 20 Hz und 10 Hz als auch Geräusche mit Frequenzsprung 100 % und Rauigkeitsänderung 10 Hz signifikant lästiger bewertet wurden als Geräusche ohne AVAS_stat.

Die Lästigkeitsbewertungen zeigen zwischen den Gruppen keine signifikanten Unterschiede. Es zeigt sich, dass die blinden Probanden folgendes Geräusch signifikant als lästiger bewerteten haben als die sehenden Probanden: Geräusch mit Pegelstufe 1 und ohne AVAS_stat ($p = 0,031$).

Geräusche mit AVAS_stat		Signifikanz
Frequenzsprung 0 %	Rauigkeitsänderung 30 Hz	0,051
	Rauigkeitsänderung 20 Hz	0,035
	Rauigkeitsänderung 10 Hz	0,012
Frequenzsprung 50 %	Rauigkeitsänderung 30 Hz	0,030
	Rauigkeitsänderung 20 Hz	0,017
	Rauigkeitsänderung 10 Hz	0,032
Frequenzsprung 100 %	Rauigkeitsänderung 30 Hz	0,061
	Rauigkeitsänderung 20 Hz	0,084
	Rauigkeitsänderung 10 Hz	0,022

Tab. 19: Paarweise Vergleiche der Ortungsfehler zwischen UN-Geräuschen ohne Stationär-Geräusch und den UN-Geräuschen mit Stationär-Geräuschen und den einzelnen Parametervariationen für die Situation „Kreuzung“

Folgende Geräusche haben die blinden und sehbeeinträchtigen Probanden als weniger lästig bewertet als die sehenden Probanden:

- Geräusch mit Pegelstufe 1, Frequenzsprung 50 % und Rauigkeitsänderung 30 Hz ($p = 0,045$),
- Geräusch mit Pegelsprung, Frequenzsprung 50 % und Rauigkeitsänderung 20 Hz ($p = 0,026$),
- Geräusch mit Pegelsprung, Frequenzsprung 100 % und Rauigkeitsänderung 20 Hz ($p = 0,039$),

- Geräusch mit Pegelstufe 2, Frequenzsprung 50 % und Rauigkeitsänderung 30 Hz ($p = 0,010$),
- Geräusch mit Pegelstufe 2, Frequenzsprung 50 % und Rauigkeitsänderung 10 Hz ($p = 0,010$),
- Geräusch mit Pegelstufe 2, Frequenzsprung 100 % und Rauigkeitsänderung 10 Hz ($p = 0,035$).

Zwischen den Geschlechtern zeigt sich nur ein signifikanter Unterschied bei der Bewertung des Geräusches mit Pegelsprung, Frequenzsprung 100 % und Rauigkeitsänderung 20 Hz ($p = 0,012$). Dieses Geräusch wurde von den weiblichen Probanden als lästiger empfunden.

5.7 Feldversuch

In diesem Teil des Projektes sollten die Ergebnisse der Hörversuche im Labor in einem Workshop am 12.09.2017 an der TU Dresden dargestellt und diskutiert werden. An dem Workshop nahmen neben den Projektauftraggebern (Bundesanstalt für Straßenwesen), Vertreter des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, Vertreter der Automobilindustrie, der Verkehrs- Unfallforschung, Vertreter vom europäischen und deutschen Blinden- und Sehbehinderten Verband und auch ein Anwohner und Mitglied der Lärmgruppe Dresden teil. Des Weiteren wurden einige ausgewählte Geräusche im Rahmen eines Feldversuchs unter realistischen Bedingungen getestet.

5.7.1 Versuchsaufbau

Der Feldtest wurde auf einer trockenen, sauberen Asphaltstraße auf dem Testgelände des Fraunhofer IVI in Dresden durchgeführt. Um die Zusatzgeräusche unter realen Einsatzbedingungen testen zu können, musste ein Soundgenerator in ein Fahrzeug eingebaut werden. Das Soundsyntheseframework wurde dann sowohl an den CAN-Bus des Fahrzeugs angeschlossen, um die aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit auslesen zu können, als auch an einen Lautsprecher zur Geräuschabstrahlung. Dafür konnte einen Smart ForTwo Electric Drive von der Stadtreinigung Dresden verwendet werden, da hier beides aus einem vorherigen Projekt verbaut wurde.

Die Reaktionen der Probanden auf das anfahrende oder anhaltende Fahrzeug wurden durch Handhe-



Bild 67: Durchführung des Feldtests für das anfahrende Fahrzeug

ben kommuniziert. Mit einer Kamera wurden sowohl die Fahrzeugposition als auch die Probandenreaktionen aufgezeichnet, sodass die resultierenden Videos zur Ermittlung der Reaktionszeiten verwendet werden konnten. Der entsprechende Versuchsaufbau ist in Bild 67 dargestellt.

Da aufgrund des enormen Aufwands eine Verifizierung aller Geräusche in allen Situationen im Gegensatz zur Labor-Situation nicht möglich war, sollten sowohl die Situation als auch die Zusatzgeräusche auf die für den Feldtest Sinnvollsten beschränkt werden.

Daher sollten die Situation im Feldtest berücksichtigt werden, die im Labor signifikante Ergebnisse gezeigt haben. Es sollte folglich der Einfluss der Parameter in der Situation anfahrendes Fahrzeug, anhaltendes Fahrzeug und Parkplatz untersucht werden. Der Abstand des Fahrzeugs vom Probanden zum Zeitpunkt des Anfahrens betrug 6,5 m, wodurch beide Situationen vergleichbar zum Laborversuch sind. Um ein Hintergrundgeräusch kontrolliert darbieten zu können, wurde das Geräusch aus dem Laborversuch (Bundestraße 55 dB(A)) mit einem Lautsprecher kalibriert abgestrahlt.

5.7.2 Stimuli

Im Feldversuch wurden lediglich die Parameterkombinationen untersucht, die im Labor signifikante Ergebnisse lieferten. In diesem Feldversuch wurden nur die Geräusche mit Pegelstufe 2 getestet.

Im Laborversuch wurden die Geräusche mit Pegelstufe 2 als lästiger bewertet als die Geräusche mit Pegelstufe 1. Allerdings wurden die Unterschiede zwischen den Parametervariationen innerhalb der

Pegelstufe gleich bewertet. Diesbezüglich wurden in diesem Feldversuch nur die Geräusche mit Pegelstufe 2 bewertet, da hier die Unterschiede zwischen den Parametern deutlicher wahrnehmbar sind. Ein Überblick über alle Stimuli des Feldversuchs ist in Tabelle 20 dargestellt.

5.7.3 Probanden

Am Feldversuch nahmen die Teilnehmer des Workshops teil, womit neben den Vertretern der Bundesanstalt für Straßenwesen, des Bundesministerium für Verkehr und Infrastruktur, Vertretern der Automobilindustrie, ein Vertreter einer regionalen Lärmgruppe und einem Vertreter der Verkehrs-Unfallforschung auch nationale und internationale Vertreter von Blinden- und Sehbehindertenverbände die Geräusche beurteilen konnten. Insgesamt beteiligten sich 11 Personen an dem Feldversuch.

5.7.4 Ergebnisse

Die Ergebnisse des Feldversuchs für die Situationen des anhaltenden Fahrzeugs sind in Bild 68 dargestellt.

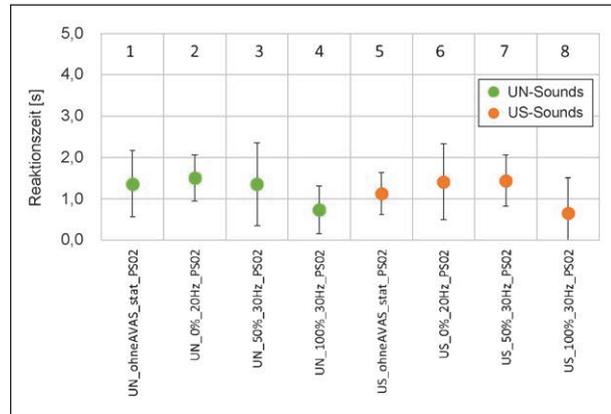


Bild 68: Reaktionszeiten der Situation „Anhalten“ im Feldversuch

Situation	Pegel	Stationär-Geräusch	Frequenzsprung	Rauigkeitsänderung	Geräusch
Anhaltendes Fahrzeug	PS02	Nein	Nein	Nein	UN
	PS02	Ja	0 %	20 Hz	UN
	PS02	Ja	50 %	30 Hz	UN
	PS02	Ja	100 %	30 Hz	UN
	PS02	Nein	Nein	Nein	US
	PS02	Ja	0 %	20 Hz	US
	PS02	Ja	50 %	30 Hz	US
	PS02	Ja	100 %	30 Hz	US
Anfahrendes Fahrzeug	PS02	Nein	Nein	Nein	UN
	PS02	Ja	0 %	20 Hz	UN
	PS02	Ja	50 %	30 Hz	UN
	PS02	Ja	100 %	30 Hz	UN
	PS02	Nein	Nein	Nein	US
	PS02	Ja	0 %	20 Hz	US
	PS02	Ja	50 %	30 Hz	US
	PS02	Ja	100 %	30 Hz	US
Parkplatz	PS02	Nein	Nein	Nein	UN
	PS02	Ja	50 %	30 Hz	UN
	PS02	Ja	100 %	30 Hz	UN
	PSp	Ja	0 %	10 Hz	UN
	PS02	Ja	0 %	10 Hz	UN
	PS02	Nein	Nein	Nein	US
	PS02	Ja	100 %	30 Hz	US

Tab. 20: Übersicht über die im Feldtest verifizierten Parameterkombinationen

Bei einem UN-Geräusch (grüne Kreise) ohne Stationär-Geräusch (Geräusch 1) wurde das Fahrzeug mit UN-Geräusch im Mittel 0,62 s später wahrgenommen als das UN-Geräusch mit Stationär-Geräusch: Frequenzsprung 100 % und Rauigkeit 30 Hz (Geräusch 4). Im Feldversuch zeigen sich bei den UN-Geräuschen zwischen ohne Stationär-Geräusch oder Stationär-Geräusche mit Frequenzsprung 0 %, Rauigkeitsänderung 20 Hz (Geräusch 2) oder Frequenzsprung 50 %, Rauigkeitsänderung 30 Hz (Geräusch 3) nur leichte Unterschiede. Ein ähnliches Phänomen lässt sich auch bei den Reaktionszeiten der US-Geräusche (orange Kreise) beobachten. Hier wird das Geräusch mit Stationär-Geräusch: Frequenzsprung 100 % und Rauigkeit 30 Hz (Geräusch 8) am frühesten erkannt. So wird dies beispielsweise im Mittel 0,48 s früher detektiert als das US-Geräusch ohne Stationär-Geräusch (Geräusch 5). Zwischen den anderen zwei Geräuschvarianten (Geräusch 6 und 7) sind nur leichte Unterschiede zu erkennen.

Die Ergebnisse des Feldversuchs für die Situationen anführendes Fahrzeug sind in Bild 69 dargestellt. Hier zeigen sich kaum Unterschiede zwischen den insgesamt acht Varianten aus Fahrgeräusch (UN: grüne Kreise/US: orange Kreise), mit oder ohne Stationär-Geräusch. Dies bestätigt das, was die Probanden während des Versuches geäußert haben. Allerdings zeigt sich eine leichte Tendenz, dass die Kombination Frequenzsprung 100 % mit Rauigkeitsänderung 30 Hz (Geräusch 4) früher detektiert wurde, als Geräusche ohne Stationär-Geräusch (Geräusch 1) (im Mittel 0,32 s).

Bei der Parkplatzsituation im Feldversuch zeigen sich ebenfalls nur kleine Unterschiede (vgl. Bild 70). Im Mittel zeigen sich keine Unterschiede zwischen den Geräuschen ohne Stationär-Geräusch (UN: Geräusch 1 und US: Geräusch 6) und einem Frequenzsprung 100 % und Rauigkeitsänderung 30 Hz (UN: Geräusch 3, US: Geräusch 7). Das UN-Geräusch Frequenzsprung 100 % mit Rauigkeitsänderung 30 Hz (Geräusch 3) ist im Mittel 0,08 s früher detektierbar. Allerdings zeigt sich hier eine geringere Standardabweichung, was darauf hindeutet, dass sich die Probanden in der Detektion einig waren. Interessant ist allerdings auch, dass das UN-Geräusch mit Stationär-Geräusch Frequenzsprung 0 % und Rauigkeitsänderung 10 Hz (Geräusch 4) im Mittel 0,58 s später detektiert wurde als das UN-Geräusch ohne Stationär-Geräusch (Geräusch 1).

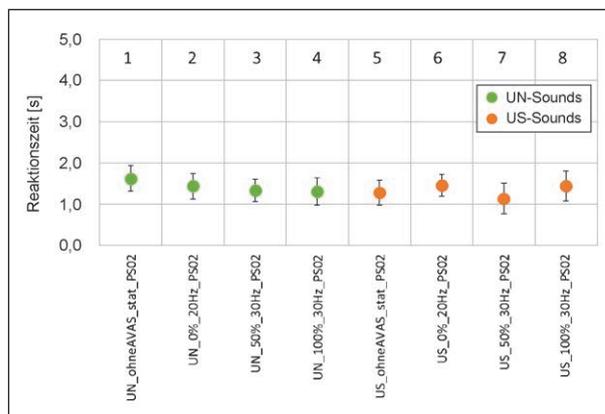


Bild 69: Reaktionszeiten der Situation „Anfahren“ im Feldversuch

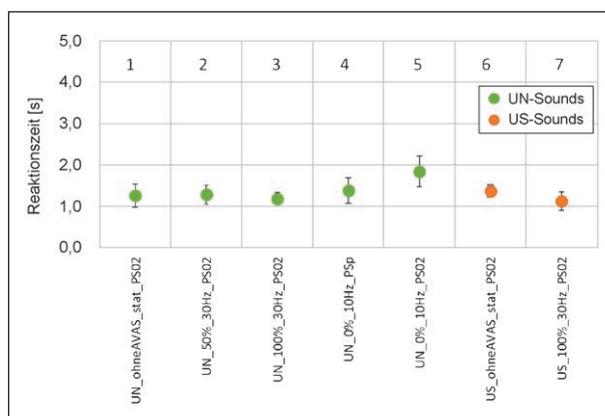


Bild 70: Reaktionszeiten der Situation „Parkplatz“ im Feldversuch

5.8 Einfluss bestehender Warnsysteme – Kollisionsgeschwindigkeiten/Verletzungsschwere

Die Verkehrsunfallforschung an der TU Dresden GmbH (VUFO) übernahm im Unterauftrag die deskriptive Analyse von Verkehrsunfällen mit Personenschaden aus der „German In-Depth Accident Study“ (GIDAS) und die Erstellung von Verletzungsriskofunktionen (VRF) zur Prognose der Verletzungswahrscheinlichkeit von Fußgängern.

5.8.1 Datenbasis

Datenbank

GIDAS ist ein Gemeinschaftsprojekt der BAST und der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e. V. (FAT). Die Organisationsstruktur des Projekts ist in Bild 71 dargestellt. Es besteht seit Juli 1999 und umfasst Daten aus den Erhebungsgebieten Dres-

den und Hannover (jeweils das Stadtgebiet und Umland). In jedem der Gebiete werden jährlich etwa 1.000 Unfälle dokumentiert, sodass in der GIDAS-Datenbank jährlich rund 2.000 neue Fälle codiert werden. In GIDAS werden ausschließlich Unfälle mit mindestens einer verletzten Person erhoben, welche innerhalb der Erhebungszeit (zwei Sechsstunden-Schichten täglich) im Erhebungsgebiet ge-

schahen. Dabei werden an der Unfallstelle, im Krankenhaus und in der prospektiven Analyse bis zu 3.400 Einzeldaten pro Unfall erhoben. Im Anschluss an die Dokumentation wird jeder Unfall rekonstruiert und anonymisiert.

Da die Erhebungsgebiete topografisch einen guten Bundesdurchschnitt darstellen, die Erhebung nach einem genau definierten Stichprobenplan erfolgt und die Fallzahl entsprechend hoch ist, kann die GIDAS-Datenbank mithilfe einer anschließenden Gewichtung für repräsentative Aussagen zum deutschen Unfallgeschehen genutzt werden. Für weitere Informationen siehe Tabelle 21 [23].

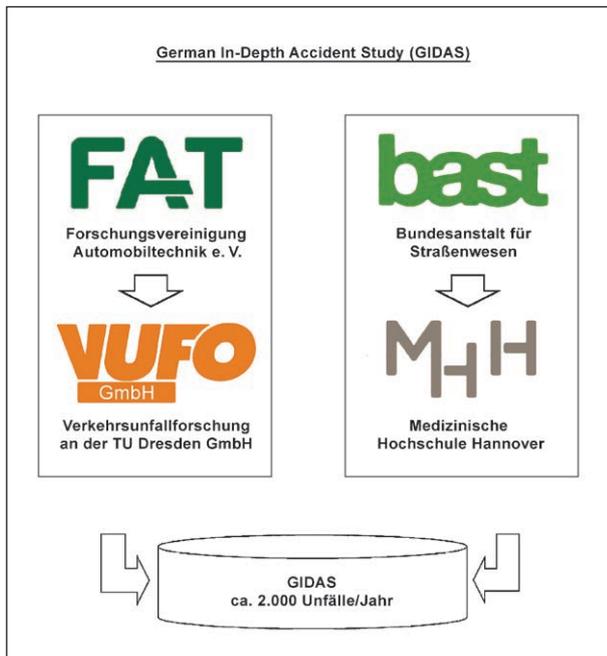


Bild 71: Organisationsstruktur des GIDAS-Projektes

Masterdatensatz

Zunächst wurde der gesamte GIDAS-Datensatz (Datenbankstand Juli 2016) hinsichtlich des Bearbeitungsstatus gefiltert. So werden ausschließlich Fälle betrachtet, die bereits rekonstruiert wurden, damit relevante Informationen (beispielsweise die Ausgangsgeschwindigkeit) für jeden betrachteten Fall bekannt sind. Somit werden von den 32.604 in GIDAS enthaltenen Unfällen die 29.305 fertig rekonstruierten Unfälle betrachtet (Bild 72).

Da aufgrund des genannten Stichprobenplans in GIDAS eine leichte Verschiebung hin zu Unfällen mit schweren bzw. tödlichen Verletzungen zu be-

	Querens/Überschreiten			Ein- und Ausparken/ Manövrieren	Abbiegen
Unfalltyp	272	429	455	562	221
	274	431	459	569	222
	401	432	461	571	241
	402	433	462	572	242
	403	434	463	702	273
	404	435	464	703	275
	405	436	465	709	282
	409	439	469	711	284
	411	441	471	712	481
	412	442	472	713	482
	413	443	473	714	483
	414	444	479	715	484
	419	449	491	719	489
	421	451	492		
	422	452	493		
	423	453	494		
	424	454	499		

Tab. 21: Zuteilung der Unfalltypen zu den Unfallszenarien

merken ist, wird eine Gewichtung der Unfallzahlen auf das deutsche Verkehrsunfallgeschehen durchgeführt. Mithilfe der Gewichtung lassen sich repräsentative Aussagen treffen. Die Gewichtung erfolgt gemäß Bild 73 mit den Zahlen des Statistischen Bundesamtes (Destatis).

Die Gewichtung von GIDAS-Daten erfolgt in der Regel immer auf das letzte Jahr, welches vollständig in Destatis verfügbar ist. Mit dieser Art der Gewichtung werden die Daten auf das aktuelle Unfallgeschehen gewichtet, da dieses für die Entwicklung neuer Sicherheitssysteme von Interesse ist.

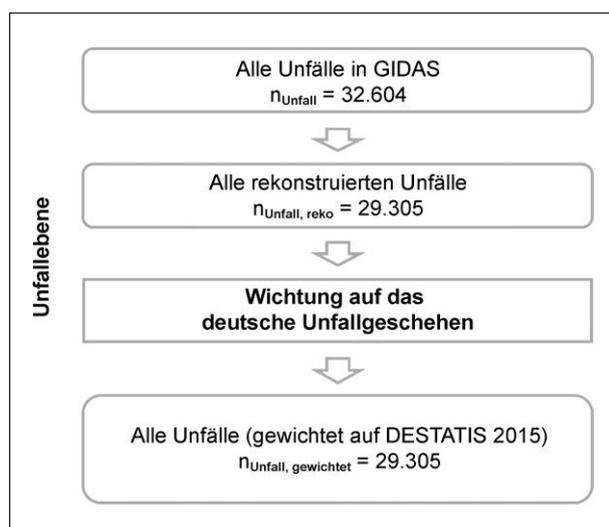


Bild 72: Fallzahlen Unfallebene

Des Weiteren ist anzumerken, dass die Gewichtung der Daten dazu führt, dass auch Dezimalstellen möglich sind. Der Übersichtlichkeit wegen wurden alle Zahlen gerundet. Somit können an mancher Stelle Rundungsfehler zu leichten Abweichungen der Zahlen untereinander führen.

Darüber hinaus sind weitere Filterschritte notwendig (siehe Bild 74). Zunächst wurden Kollisionen zwischen Personenkraftwagen (Pkw) und Fußgängern betrachtet. Fußgänger wurden hinsichtlich der Ausgangsgeschwindigkeit des Pkw noch einmal unterteilt in kleiner/gleich 30 km/h und größer als

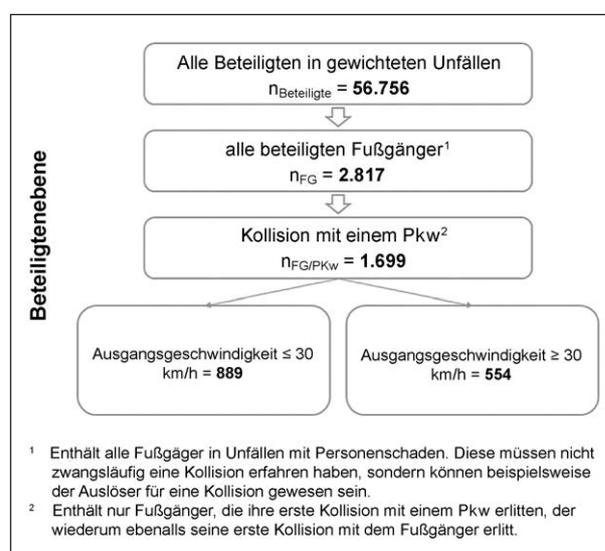


Bild 74: Fallzahlen Beteiligteebene

Um Verschiebungen zum deutschen Unfallgeschehen zu korrigieren, werden die Daten der GIDAS-Datenbank gewichtet. Die Wichtung erfolgt nach den Kriterien Unfalltyp, Ortslage und Verletzungsschwere gemäß amtlicher Definition.

Die Unfalltypen (UTYP)

- (1) Fahr Unfall
- (2) Abbiegeunfall
- (3) Einbiegen/Kreuzen
- (4) Überschreiten
- (5) Ruhender Verkehr
- (6) Längsverkehr
- (7) Sonstige

Die Verletzungsschwere nach amtlicher Definition (PVERL)

- (3) Ambulant behandelt (= leicht verletzt)
- (4) Stationär behandelt (= schwer verletzt)
- (5) Getötet (= am Unfalltag bzw. in den folgenden 30 Tagen verstorben)

Die Ortslage (ORTSL)

- (3) Innerhalb geschlossener Ortschaften
- (4) Außerhalb geschlossener Ortschaften

Die Berechnung des Wichtungsfaktors als Korrekturfaktor auf das Jahr 2015 berechnet sich wie folgt:

$$\text{Gewichtungsfaktor} \times \frac{\text{Unfall GIDAS (UTYP, PVERL, ORTSL)}}{\text{Alle Unfälle GIDAS}} = \frac{\text{Unfälle DESTATIS 2015 (UTYP, PVERL, ORTSL)}}{\text{Alle Unfälle DESTATIS 2015}}$$

Bild 73: Gewichtung GIDAS

30 km/h. Bei den Untersuchungen wird immer nur eine Kollision betrachtet. Einer Kollision umfasst hier immer zwei Beteiligte.

5.8.2 Bestimmung der Unfallszenarien

Die Unterteilung in die verschiedenen Unfallszenarien (Queren/Überschreiten, Ein- und Ausparken/ Manövrieren, Abbiegen) erfolgt nach Auswahl dazu passender Unfalltypen³. Diese sind Tabelle 21 zu entnehmen.

5.8.3 Ausgangs- und Kollisionsgeschwindigkeiten in Pkw-Fußgänger-Kollisionen

An dieser Stelle werden einleitend die Ausgangs- und Kollisionsgeschwindigkeiten in den verschiedenen Unfallszenarien ausgewertet. Dabei werden ausschließlich die Pkw-Fußgänger-Anpralle untersucht.

Bild 75 zeigt, dass der Großteil (ca. 60 %) der Unfälle beim Queren/Überschreiten bei Ausgangs-

geschwindigkeiten von über 30 km/h geschehen. Die beiden anderen Unfallszenarien geschehen in der Regel bei Ausgangsgeschwindigkeiten bis zu 30 km/h und sind somit relevanter für langsam fahrende Fahrzeuge. Die Geschwindigkeitsgrenze 30 km/h wurde gewählt, da elektrisch angetriebene Fahrzeuge laut US und UN-Regularien bis zu dieser Geschwindigkeit zukünftig ein synthetisch erzeugtes Geräusch emittieren müssen. [4, 26]

Da die meisten Pkw-Fahrer kurz vor dem Zusammenstoß mit dem Fußgänger ihr Fahrzeug noch abbremsen konnten, liegen die Kollisionsgeschwindigkeiten bei den Abbiege-Unfällen und den Queren-/Überschreiten-Unfällen deutlich unter den Ausgangsgeschwindigkeiten (Bild 76). Bei den Ein- und Ausparken- bzw. den Manövrier-Unfällen lässt sich hingegen erkennen, dass viele der betrachteten Fahrzeuge kurz vor der Kollision erst anfahren und dabei einen in der Nähe des Autos befindlichen Fußgänger übersehen. In diesen Fällen ist die Kollisionsgeschwindigkeit höher als die Ausgangsgeschwindigkeit.

Die Fälle, in denen die Kollisionsgeschwindigkeit 0 km/h beträgt, spiegeln die Situationen wider, in denen ein Fußgänger gegen ein stehendes Fahrzeug läuft/rennt.

³ Der Unfalltyp beschreibt die unfallursächliche Konfliktsituation und kann beispielsweise unter <https://udv.de/de/publikationen/broschueren/unfalltypen-katalog> heruntergeladen werden.

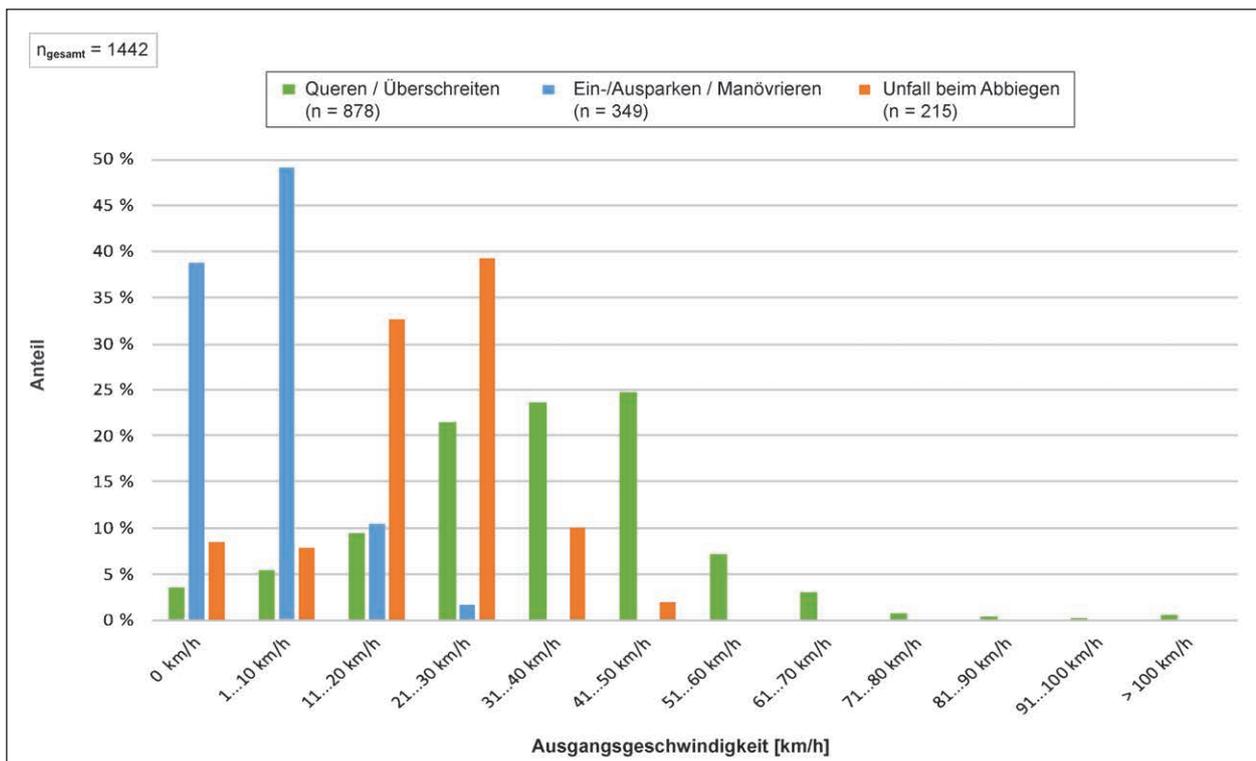


Bild 75: Verteilung der Ausgangsgeschwindigkeit

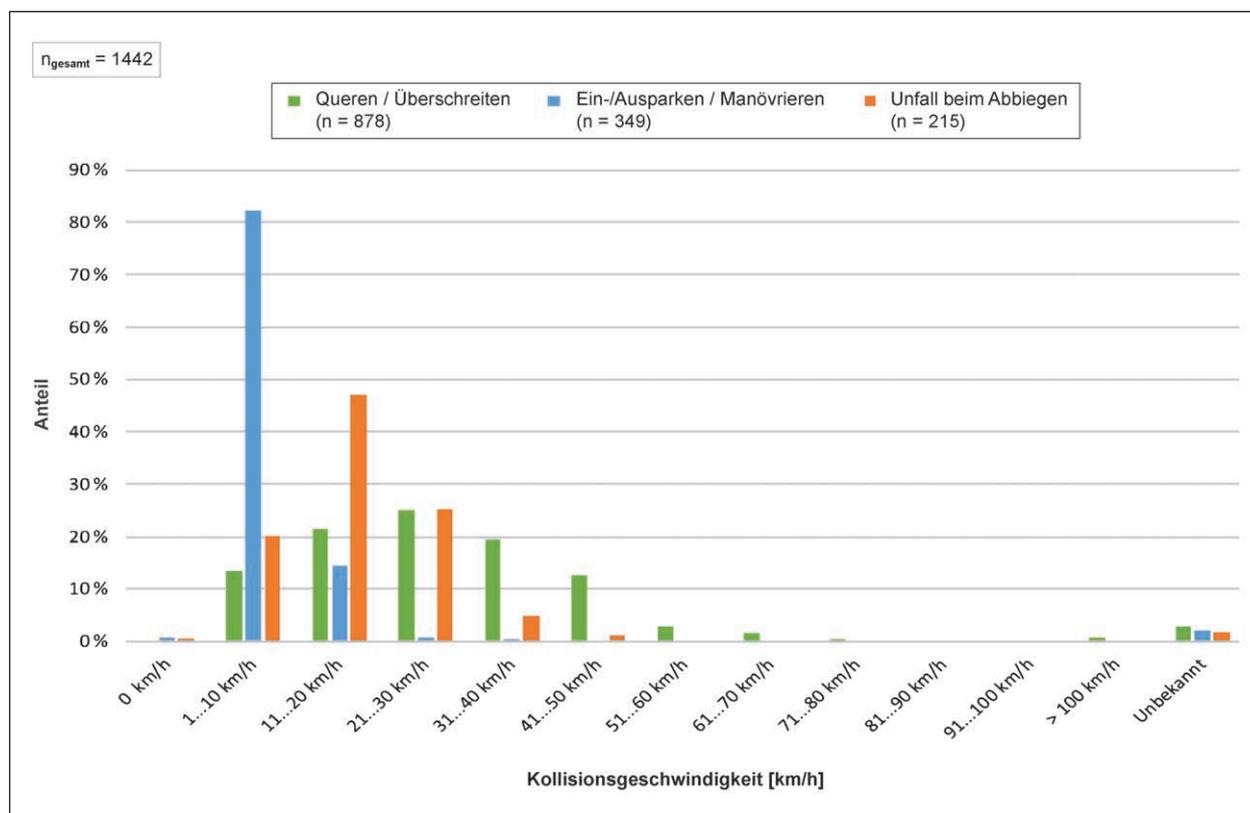


Bild 76: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit

5.8.4 Tieferegehende Analysen von Pkw-Fußgänger-Kollisionen

Die tieferegehenden statistischen Auswertungen beziehen sich ausschließlich auf Pkw-Fußgänger-Kollisionen mit Ausgangsgeschwindigkeiten der Pkw bis zu 30 km/h.

In Bild 77 ist die Verteilung der Verletzungsschwere der Fußgänger in Abhängigkeit vom Unfallszenario zu sehen. In der Darstellung ist zu beachten, dass die Skala der Anteile vergrößert dargestellt ist und erst bei 75 % beginnt.

Es lässt sich feststellen, dass in Ein-, Auspark- und Manövrier-Situationen anteilig die meisten Fußgänger ums Leben gekommen sind. Dies resultiert vor allem aus dem sehr hohen Anteil älterer Fußgänger, die häufig in diese Situationen involviert sind (über 55 % der Fußgänger sind über 60 Jahre alt) und beispielsweise auch von rückwärtsfahrenden Pkw angefahren werden. Der daraus resultierende Sturz auf die Fahrbahn (Sekundärprall) kann insbesondere bei älteren Fußgängern schwere oder gar tödliche Verletzungen verursachen.

Der Anteil der Schwerverletzten ist bei Unfällen beim Abbiegen tendenziell am höchsten, wobei die

Unterschiede zu den anderen Szenarien marginal sind.

Um identifizieren zu können, ob ein Sicherheits- oder Komfortsystem Einfluss auf die jeweilige Unfallsituation hatte, wurde deren Verbau in den betrachteten Fahrzeugen untersucht. Es werden ausschließlich Systeme betrachtet, die nach ihrer Funktionsbeschreibung in der jeweiligen Unfallsituation relevant waren.

Querens/Überschreiten

Insgesamt konnten 350 Unfälle dem Querens-/Überschreiten-Szenario bzw. den 51 relevanten Unfalltypen (siehe Tabelle 21) zugeordnet werden. Sie repräsentieren 39,4 % der Pkw-Fußgänger-Kollisionen mit Kollisionsgeschwindigkeiten unter 30 km/h.

In Bild 78 sind die fünf Unfalltypen dargestellt, die am häufigsten zu einem Querens- bzw. Überschreiten-Unfall führen.

Mehr als ein Drittel der 350 untersuchten Fälle entfallen auf die drei häufigsten Unfalltypen (421, 423 und 451). Insgesamt repräsentieren die fünf häufigsten

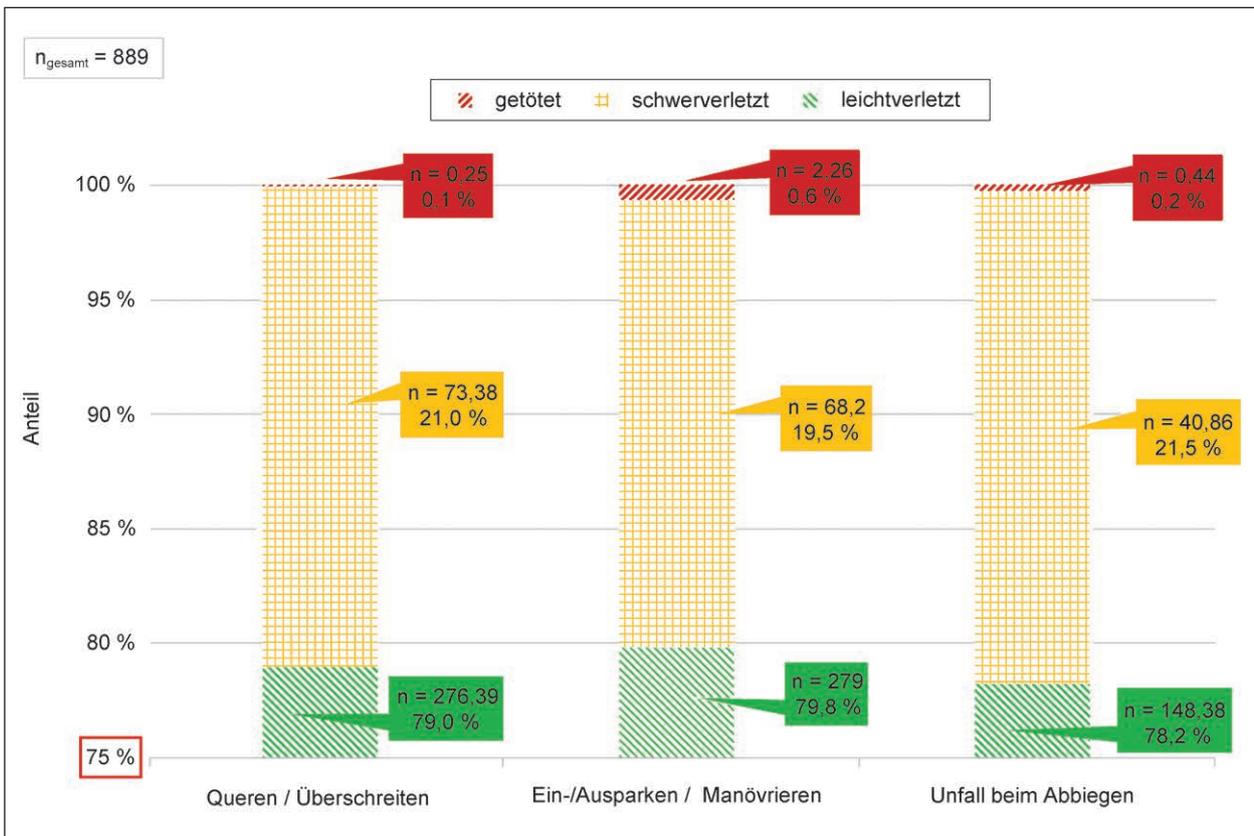


Bild 77: Verteilung der Verletzungsschwere der Fußgänger

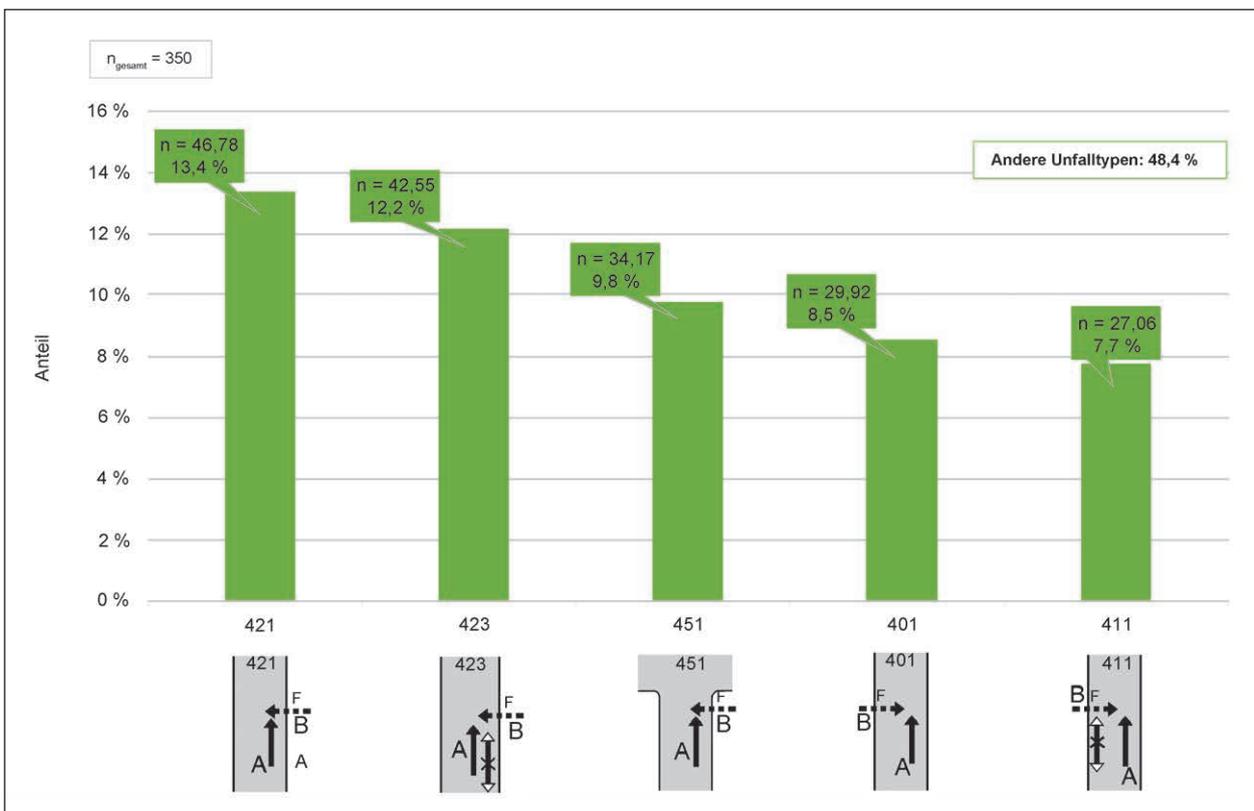


Bild 78: Top 5 der Unfalltypen beim Queren/Überschreiten

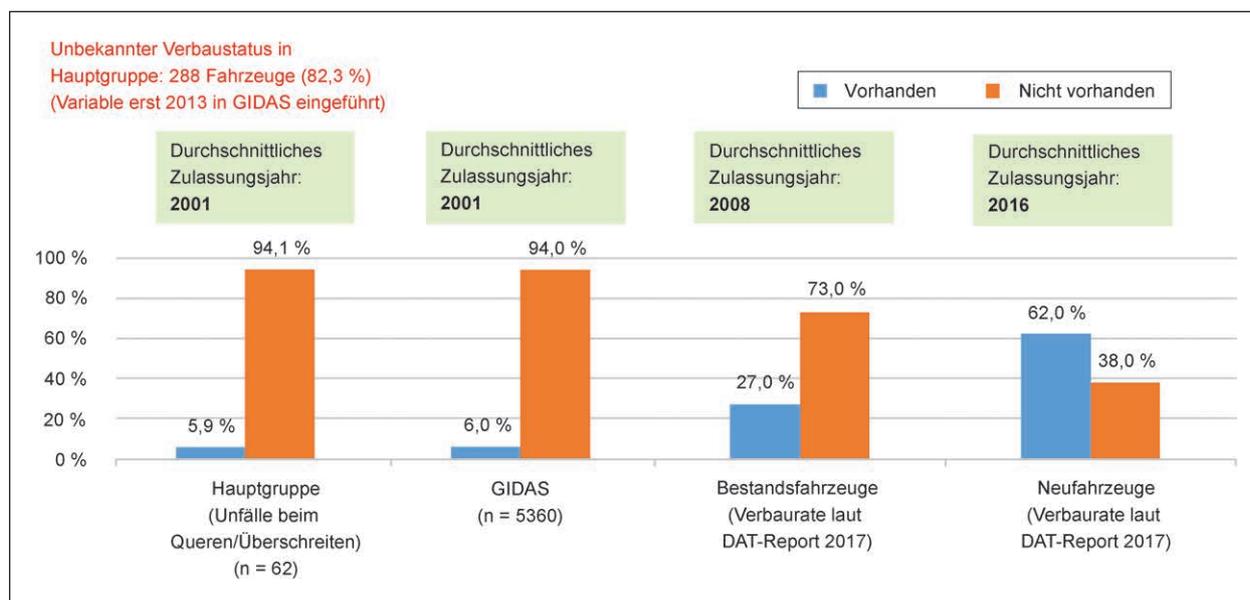


Bild 79: Verbau von Start-Stopp-Systemen in Queren- bzw. Überschreiten-Situationen

figsten Unfalltypen in der Gruppe „Queren-/Überschreiten“ bereits mehr als die Hälfte aller Unfälle.

An dieser Stelle wird die Verbaurate von Start-Stopp-Systemen untersucht. Ein Start-Stopp-System schaltet den Motor automatisch aus, sobald das Fahrzeug steht. Bei Fahrzeugen mit Schaltgetriebe muss sich dieses dazu noch im Leerlauf befinden. In dieser Situation ist das Fahrzeug akustisch nicht mehr wahrnehmbar.

In Bild 79 ist die Verbaurate von Start-Stopp-Systemen bei Fahrzeugen, die in eine Konfliktsituation mit einem querenden bzw. überschreitenden Fußgänger verwickelt waren, dargestellt.

Start-Stopp-Systeme sind in den betrachteten Fahrzeugen seltener verbaut als in der aktuellen deutschen Pkw-Flotte. Der Grund liegt in den teilweise alten Daten der GIDAS-Datenbank, welche seit 1999 erhoben werden. Der Blick auf die durchschnittlichen Zulassungsjahre pro Gruppe zeigt, dass die Fahrzeuge in GIDAS im Durchschnitt etwa sieben Jahre älter sind.

Im Vergleich der Verbauraten bei Fahrzeugen in der Hauptgruppe mit allen Fahrzeugen in GIDAS lässt sich kein nennenswerter Unterschied feststellen. Das lässt darauf schließen, dass Start-Stopp-Systeme keinen Einfluss auf Kollisionen zwischen Pkw und querenden Fußgängern im Geschwindigkeitsbereich bis 30 km/h haben.

Da die Information über die Existenz eines solchen Systems erst seit dem Jahre 2013 in GIDAS codiert

wird, liegt diese für 288 der untersuchten Fahrzeuge nicht vor. Fahrzeuge mit unbekanntem Systemverbau wurden für die Auswertung ausgenommen.

Ein- und Ausparken/Manövrieren

Das Ein-/Auspark- bzw. Manövrier-Szenario umfasst 13 Unfalltypen (siehe Tabelle 21). Insgesamt entfallen 349 Fälle in GIDAS auf dieses Szenario. Sie stellen 39,3 % der Pkw-Fußgänger-Kollisionen mit Kollisionsgeschwindigkeiten bis zu 30 km/h dar.

In Bild 80 sind die fünf häufigsten Unfalltypen des Szenarios „Ein-, Auspark- oder Manövrier-Unfall“ dargestellt.

In 86,9 % der 349 untersuchten Fälle kam es zu einem Konflikt zwischen einem rückwärtsfahrenden Pkw und einem dahinter befindlichen Fußgänger (Unfalltyp 713). Zusammen mit den vier weiteren dargestellten Unfalltypen sind ca. 97 % der Unfälle in diesem Kollektiv abgedeckt.

Die oben beschriebene Herangehensweise zur Untersuchung des Einflusses von Sicherheits- und Komfortsystemen führt zu den nachfolgend dargestellten Erkenntnissen. Hier wird zunächst der Einfluss von Einparkhilfen auf Unfälle beim Ein- und Ausparken bzw. Manövrieren betrachtet. Einparkensoren sind zumeist Ultraschallsensoren in der vorderen und/oder hinteren Stoßstange. Diese geben dem Fahrer eine akustische und/oder optische Rückmeldung über den Abstand zu Gegenständen

bzw. überhaupt deren Vorhandensein im Sichtbereich der Sensoren.

In Bild 81 ist die Verbaurate von Einparkhilfen bei Fahrzeugen, die beim Ein-, Ausparken oder Manövrieren in eine Konfliktsituation mit einem Fußgänger verwickelt waren, dargestellt. Dabei wurden bei die-

ser Betrachtung alle Fahrzeuge in die Kategorie „Einparkhilfe vorhanden“ gezählt, die entweder vorn und hinten oder aber nur hinten bzw. nur vorn mit einem solchen System ausgerüstet waren.

Einparkhilfen sind in den betrachteten Fahrzeugen seltener verbaut als in der aktuellen deutschen

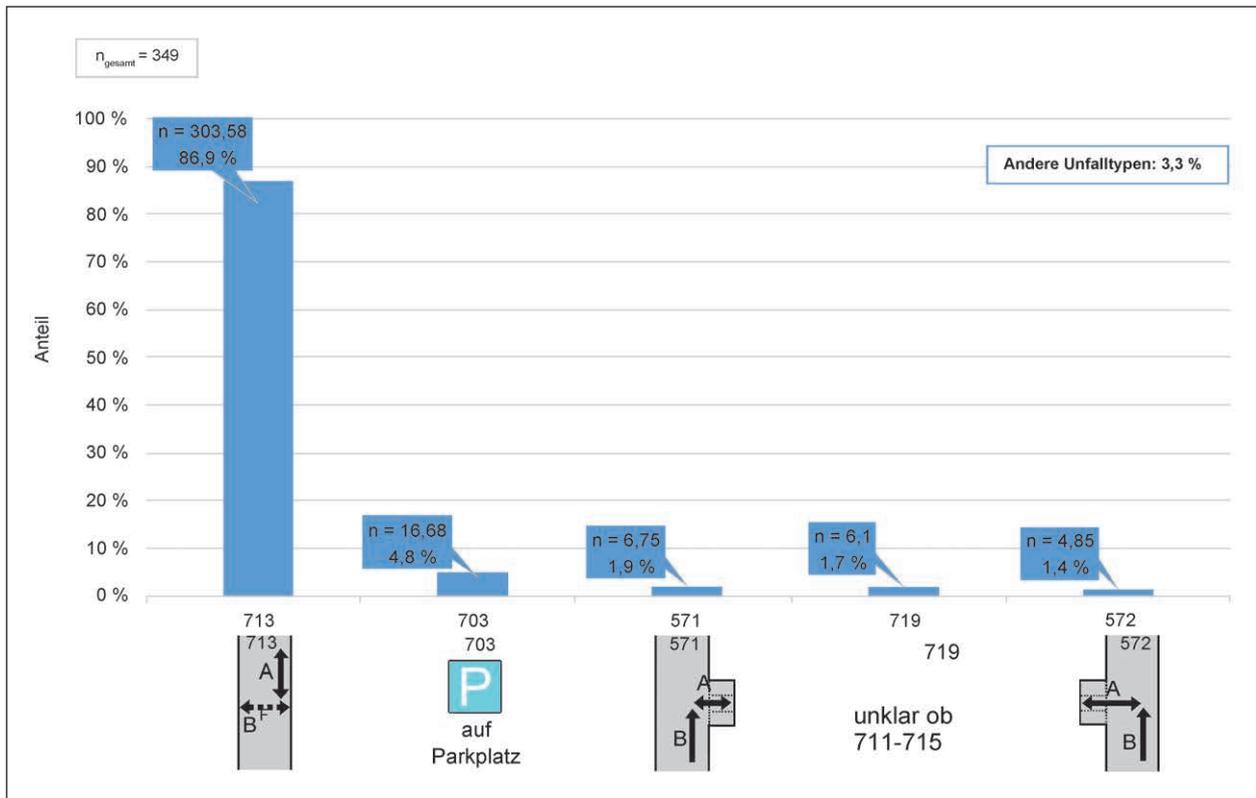


Bild 80: Top 5 der Unfalltypen beim Ein-, Ausparken oder Manövrieren

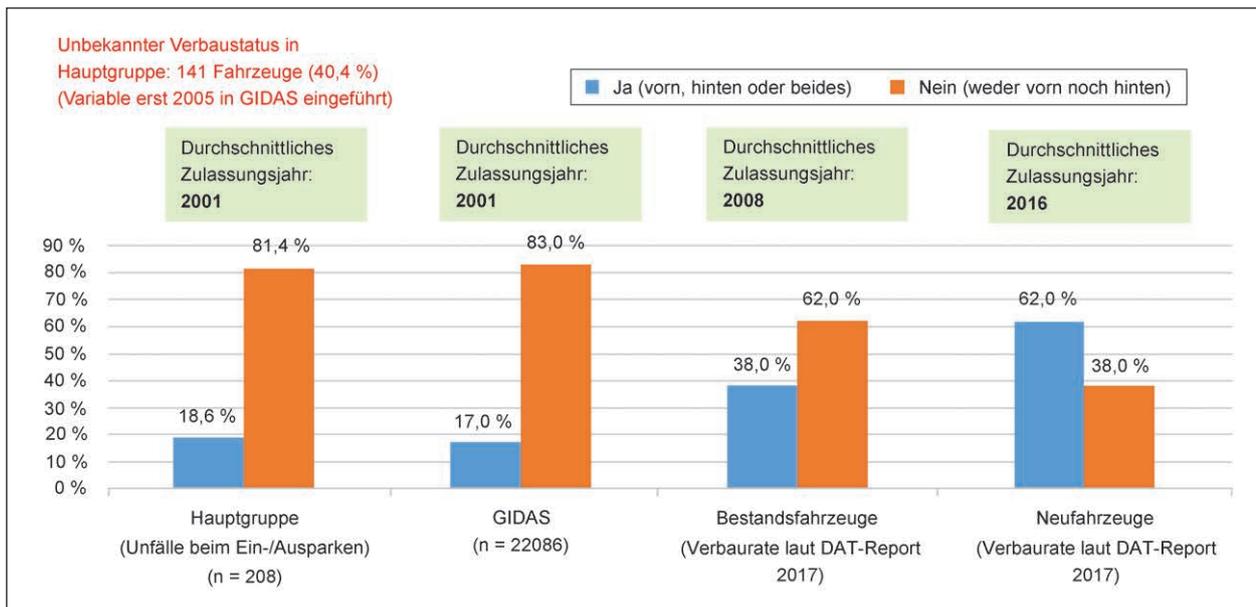


Bild 81: Verbaurate von Einparkhilfen in Ein-, Auspark- bzw. Manövrier-Situationen

Pkw-Flotte. Dieser Fakt ist wiederum auf die vergleichsweise alten Fahrzeuge in GIDAS zurückzuführen.

Beim Verbau von Einparkhilfen ist in Fahrzeugen der Hauptgruppe sogar ein höherer Anteil zu verzeichnen, als es bei der Betrachtung aller in GIDAS enthaltenen Fahrzeuge der Fall ist. Dies lässt den Schluss zu, dass der Verbau des betrachteten Sicherheitssystems keinen positiven Einfluss auf Unfälle in Park- und Manöversituationen hat. Die Vermutung liegt nahe, dass bei Menschen, die ein Fahrzeug mit Einparkhilfe bewegen, die Achtsamkeit in solchen Situationen nachlässt und sie sich in zu hohem Maß auf das Sicherheitssystem verlassen.

Da die Information über das Vorhandensein eines solchen Systems erst seit dem Jahr 2005 in GIDAS hinterlegt wird, liegt diese für 141 der untersuchten Fahrzeuge nicht vor. Fahrzeuge mit unbekanntem Systemverbau wurden von der Auswertung ausgeschlossen.

Im nächsten Schritt wird der Einfluss von Rückfahrkameras in der gleichen Unfallsituation betrachtet. Eine Rückfahrkamera bietet dem Fahrer das Bild hinter dem Fahrzeug in Echtzeit an.

Die Verbauraten von Rückfahrkameras ist in Bild 82 dargestellt und fällt sowohl in Ein-, Auspark- bzw. Manövrier-Situationen als auch in der gesamten GIDAS-Datenbank noch deutlich niedriger aus als die der Einparksensoren.

Rückfahrkameras waren in den untersuchten Fahrzeugen in nur 1,1 % der Fälle verbaut. Der Grund dafür ist auch hier darin zu finden, dass die Fahrzeuge in GIDAS im Durchschnitt 7 Jahre älter sind als die der aktuellen bundesweiten Pkw-Flotte.

Rückfahrkameras waren in den untersuchten Fahrzeugen in nur 1,1 % der Fälle verbaut. Der Grund dafür ist auch hier darin zu finden, dass die Fahrzeuge in GIDAS im Durchschnitt 7 Jahre älter sind als die der aktuellen bundesweiten Pkw-Flotte.

Rückfahrkameras wirken sich weder negativ noch positiv auf Park- und Manöviervorgänge aus. Dieses Erkenntnis bringt der Vergleich zwischen der Systemverbauraten in der Hauptgruppe mit dem in der kompletten GIDAS-Datenbank. Dem ist zu entnehmen, dass die Verbauraten ein nahezu gleiches Maß annehmen.

Auch diese Variable wird erst seit dem Jahr 2005 in GIDAS hinterlegt, sodass sie für 24 der untersuchten Fahrzeuge nicht vorliegt. Fahrzeuge mit unbekanntem System-Verbaustatus wurden von der Auswertung ausgenommen.

Zuletzt wird, wie schon bei den Unfällen mit querenden Fußgängern, untersucht, ob Start-Stopp-Systeme einen Einfluss auf die hier betrachtete Unfallsituation hatten. In Bild 83 lässt sich ermitteln, wie viele der Fahrzeuge, die beim Ein- oder Ausparken bzw. bei Manövrieren in eine Konfliktsituation mit einem Fußgänger geraten sind, mit einem Start-Stopp-System ausgerüstet waren.

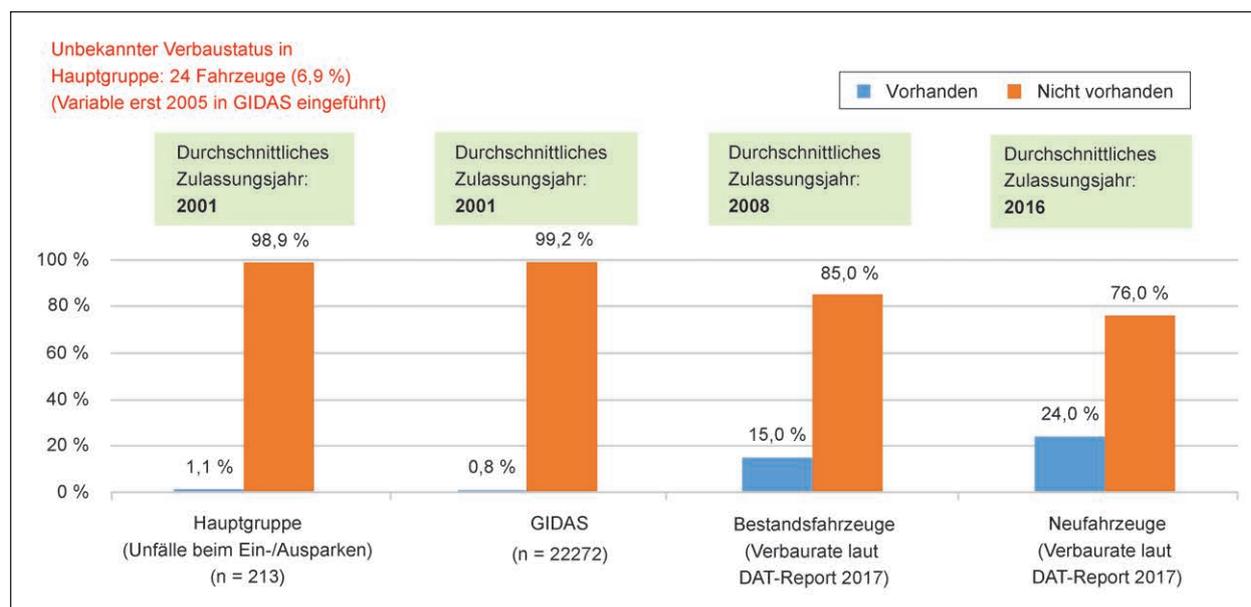


Bild 82: Verbauraten von Rückfahrkameras in Ein-, Auspark- bzw. Manövrier-Situationen

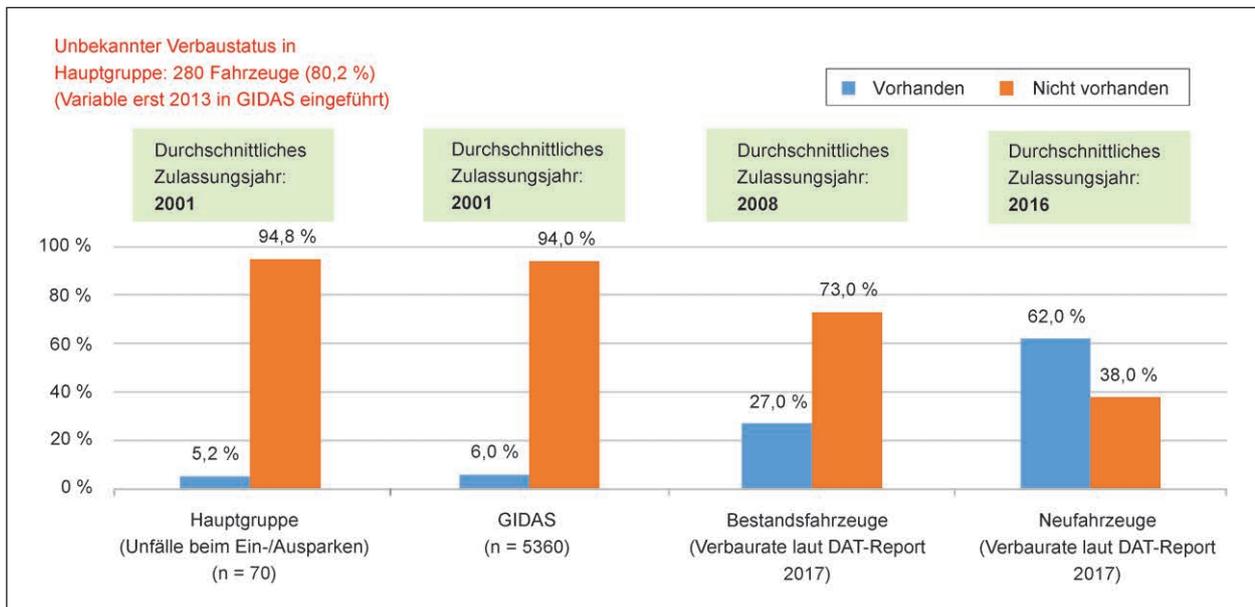


Bild 83: Verbau von Start-Stopp-Systemen in Ein-, Auspark bzw. Manövrier-Situationen

Es ist deutlich zu erkennen, dass aufgrund des höheren Fahrzeugalters in GIDAS auch hier die Verbaureate weit unter der der bundesweiten Pkw-Flotte liegt.

Die Verbaureaten bei Fahrzeugen in Park- und Manövrierunfällen fällt etwas niedriger aus als in den Fahrzeugen der gesamten GIDAS-Datenbank. Dabei ist allerdings der Unterschied zu gering, als dass er gezielte Schlussfolgerungen zulässt.

Da die Information über das Vorhandensein eines solchen Systems in Kraftfahrzeugen erst seit dem Jahr 2013 in GIDAS hinterlegt wird, liegt diese für 280 der untersuchten Fahrzeuge nicht vor. Fahrzeuge mit unbekanntem System-Verbaustatus wurden von der Auswertung ausgenommen.

Unfall beim Abbiegen

Das Abbiege-Szenario umfasst ebenfalls 13 Unfalltypen (siehe Tabelle 21). Hier konnten 190 Fälle aus GIDAS identifiziert werden, womit das Szenario 21,3 % der Pkw-Fußgänger-Kollisionen mit Kollisionsgeschwindigkeiten bis zu 30 km/h repräsentiert.

In Bild 84 sind die fünf häufigsten Unfalltypen für Abbiege-Unfälle mit Fußgängern dargestellt.

Die Unfalltypen 222 und 221 sind für drei Viertel aller Unfälle des Szenarios verantwortlich. Zusammen repräsentieren die fünf dargestellten Unfalltypen fast 99 % aller Konfliktsituationen.

Auch hier soll der Einfluss eines Sicherheits- bzw. Komfortsystems untersucht werden. Bild 85 zeigt die Verbaureate von Start-Stopp-Systemen für verschiedene Fahrzeugpopulationen.

Start-Stopp-Systeme sind in den betrachteten Fahrzeugen seltener verbaut als in der aktuellen bundesweiten Pkw-Flotte.

In Fahrzeugen in Abbiegeunfällen ist anteilig seltener ein Start-Stopp-System verbaut als in Fahrzeugen der gesamtheitlich betrachteten GIDAS-Datenbank. Dies führt zu der Erkenntnis, dass solche Systeme keinen negativen Einfluss auf Abbiegeunfälle haben.

Da die Information über das Vorhandensein eines solchen Systems erst seit dem Jahre 2013 in GIDAS hinterlegt wird, liegt diese für 139 der untersuchten Fahrzeuge nicht vor. Fahrzeuge mit unbekanntem Systemverbau wurden von der Auswertung ausgenommen.

5.8.5 Besonderheiten von leiseren Fahrzeugen

In diesem Kapitel wird untersucht, ob der Standgeräuschpegel von Pkw einen potenziellen Einfluss auf das Unfallgeschehen mit Fußgängern hat. Hierfür sind geeignete Annahmen und Ansätze notwendig, da in GIDAS zum Zeitpunkt der Projektbearbeitung noch kein Fußgänger-Unfall mit einem reinen Elektrofahrzeug aufgenommen wurde.

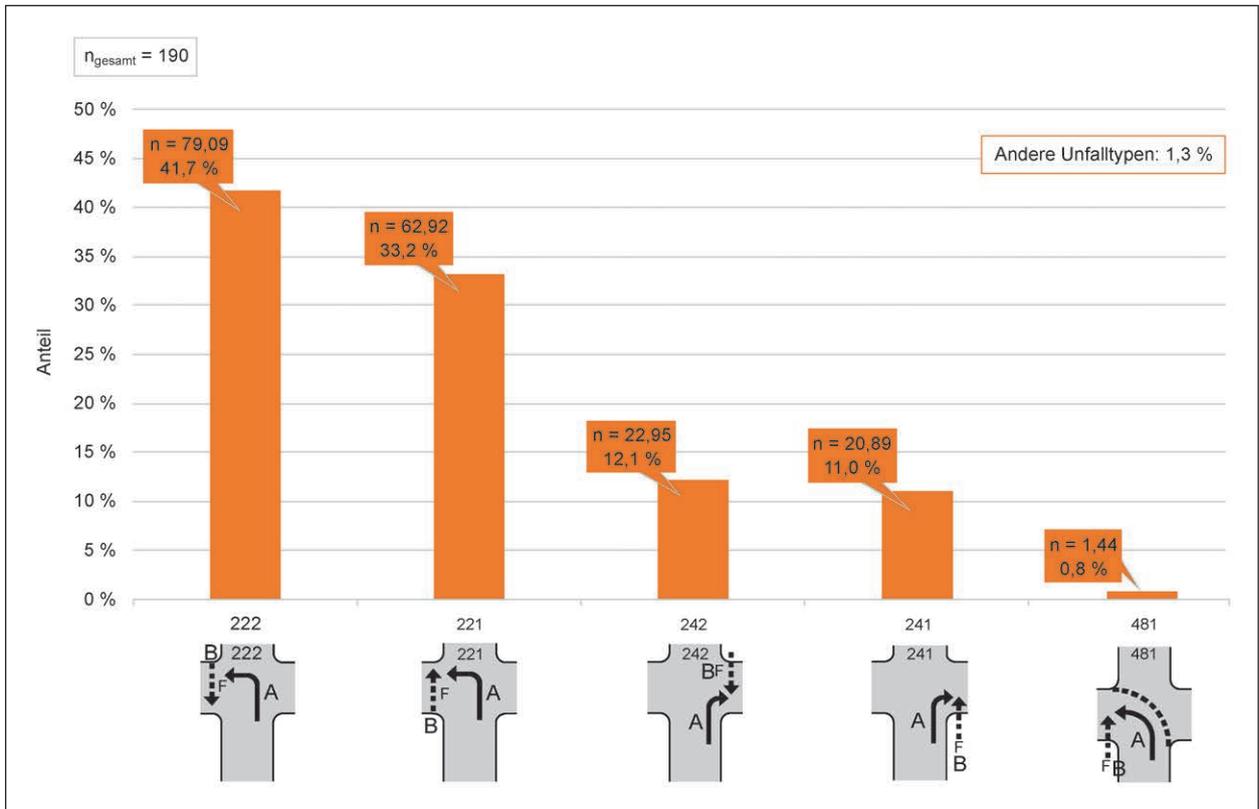


Bild 84: Top 5 der Unfalltypen beim Abbiegen

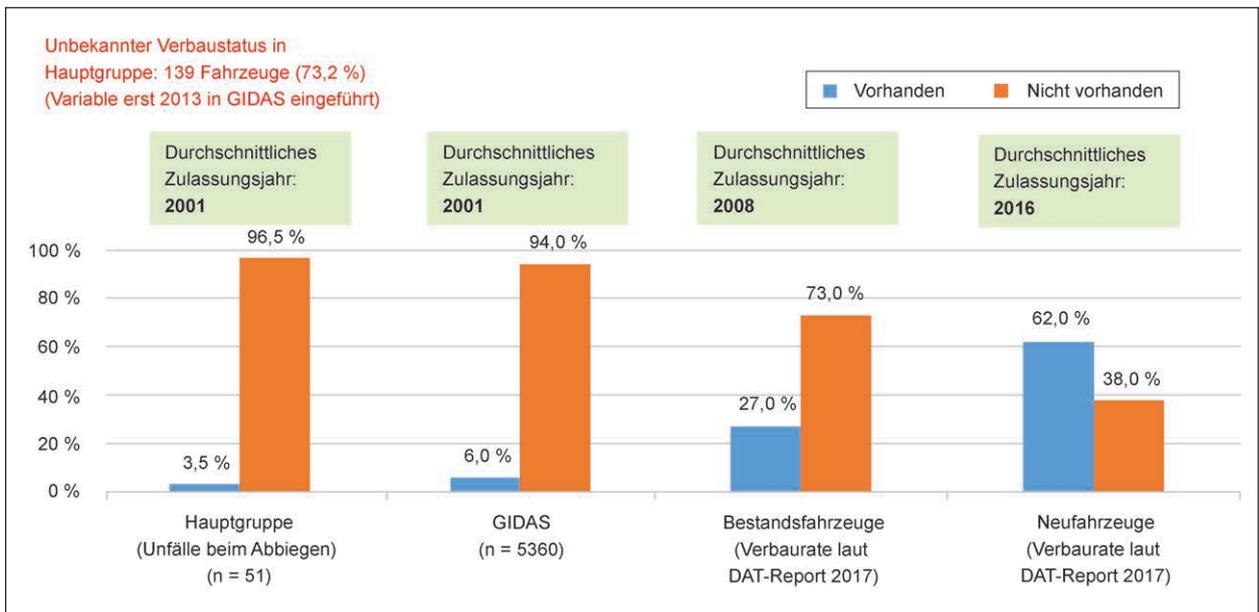


Bild 85: Verbau von Start-Stopp-Systemen in Abbiege-Situationen

Alle Auswertungen in diesem Kapitel basieren auf dem Teildatensatz aller Pkw-Fußgänger-Unfälle mit Ausgangsgeschwindigkeiten (beim Pkw) von bis zu 30 km/h.

Definition von leiseren Fahrzeugen

Für die Auswertungen musste zunächst definiert werden, welcher Standgeräuschpegel den jeweiligen Fahrzeugen zugeordnet werden kann. Die Standgeräuschpegel von Kraftfahrzeugen werden

in Deutschland hinter dem Fahrzeug gemessen. Da allerdings in den meisten Fällen der Standgeräuschpegel vor dem Fahrzeug relevant ist, ist der informative Gehalt dieses Messwertes für das zu bearbeitende Projekt nicht ausreichend.

Aus diesem Grund wurde eine Methode erarbeitet, bei der der Standgeräuschpegel im vorderen Fahrzeugbereich in Abhängigkeit vom Hubraum, die Antriebsart und dem Jahr der Markteinführung des Fahrzeuges abgeschätzt werden kann. Die Zuordnung ist in Tabelle 22 dargestellt.

Es ist unbedingt zu beachten, dass die genannte Zuordnung des Standgeräuschpegels nur eine Annäherung ist und nicht mit Herstellerangaben erfolgte

Mithilfe der Zuordnung für den Standgeräuschpegel lässt sich für die folgenden Analysen eine Hauptgruppe (alle leiseren Fahrzeuge) und eine Referenzgruppe (alle mittleren und lauten Fahrzeuge) bilden. Die Häufigkeiten der Fahrzeuge in der jeweiligen Gruppe sind in Tabelle 23 dargestellt.

Die Anteile von leiseren Fahrzeugen liegen sowohl in Unfällen mit querenden Fußgängern als auch in Park- und Manövrierunfällen bei ca. 23 %. Bei Abbiegeunfällen ist der Anteil mit 31 % höher. Daraus lässt sich ableiten, dass der Einfluss des Standgeräusches von Fahrzeugen in Abbiegeunfällen größer ist als in den anderen betrachteten Szenarien.

Analyse von leiseren Fahrzeugen

Bild 86 zeigt, wie viele Fahrzeuge nach der oben beschriebenen Methode ein leises, mittleres bzw. lautes Standgeräusch verursachen.

In der Gruppe der leiseren Fahrzeuge (Hauptgruppe) befinden sich 191 Fahrzeuge. Das entspricht einem Anteil von gut einem Fünftel aller betrachteten Fahrzeuge. Die Anzahl der Fahrzeuge mit mittlerem oder lautem Standgeräuschpegel (Referenzgruppe) betrug 574 und damit rund 65 % aller betrachteten Fahrzeuge. Bei 14 % der Fahrzeuge konnte die Standgeräuschklasse nicht ermittelt werden, da

Antriebsart	Hubraum [ccm]	Jahr der Markteinführung	Standgeräuschpegel
Benzin	< 3000	< 2000	Mittel
Benzin	≥ 3000	< 2000	Laut
Benzin	≥ 3000	≥ 2000	Mittel
Benzin	< 3000	≥ 2000	Leise
Benzin (Direkteinspritzung)	< 3000	< 2000	Leise
Benzin (Direkteinspritzung)	≥ 3000	< 2000	Mittel
Benzin (Direkteinspritzung)	≥ 3000	≥ 2000	Leise
Benzin (Direkteinspritzung)	< 3000	≥ 2000	Leise
Benzin / Gas	< 3000	< 2000	Mittel
Benzin / Gas	≥ 3000	< 2000	Laut
Benzin / Gas	≥ 3000	≥ 2000	Mittel
Benzin / Gas	< 3000	≥ 2000	Leise
Diesel	< 3000	< 2000	Laut
Diesel	≥ 3000	< 2000	Laut
Diesel	≥ 3000	≥ 2000	Laut
Diesel	< 3000	≥ 2000	Mittel
Diesel (Direkteinspritzung)	< 3000	< 2000	Mittel
Diesel (Direkteinspritzung)	≥ 3000	< 2000	Laut
Diesel (Direkteinspritzung)	≥ 3000	≥ 2000	Mittel
Diesel (Direkteinspritzung)	< 3000	≥ 2000	Leise

Tab. 22: Zuordnung Standgeräuschpegel

	Queren/ Überschreiten		Ein- und Ausparken/ Manövrieren		Abbiegen	
Hauptgruppe	74	23,4%	66	23,4%	52	31,0%
Referenzgruppe	242	76,6%	216	76,6%	116	69,0%

Tab. 23: Übersicht Fallzahlen leisere Fahrzeuge

mindestens einer der Einflussfaktoren unbekannt war.

Fahrzeuge mit unbekanntem Standgeräuschpegel werden für die weiteren Analysen von der Betrachtung ausgeschlossen.

In Bild 87 ist das Standgeräusch in Abhängigkeit von der Unfallsituation dargestellt.

Bild 88 ist zu entnehmen, dass der Anteil der Hauptgruppe bei den Unfällen beim Abbiegen mit einem knappen Drittel höher ist als bei den anderen beiden Szenarien. Das ist auch der Grund dafür, dass in Kapitel 5.8.7 dieses Berichtes ein Beispielfall aus dieser Unfallsituation näher betrachtet wird. Der An-

teil in den anderen beiden Unfallszenarien liegt bei etwa einem Fünftel.

Im nächsten Schritt wird die Verletzungsschwere des Fußgängers (nach dem Maximum Abbreviated Injury Scale von 2005 Update 2008 – MAIS) in Abhängigkeit des Standgeräusches betrachtet (Bild 88). Kollisionen mit Fußgängern, die sich Verletzungen unbekannter Schwere zugezogen haben, wurden ausgenommen. Deren Anzahl ist gesondert ausgewiesen.

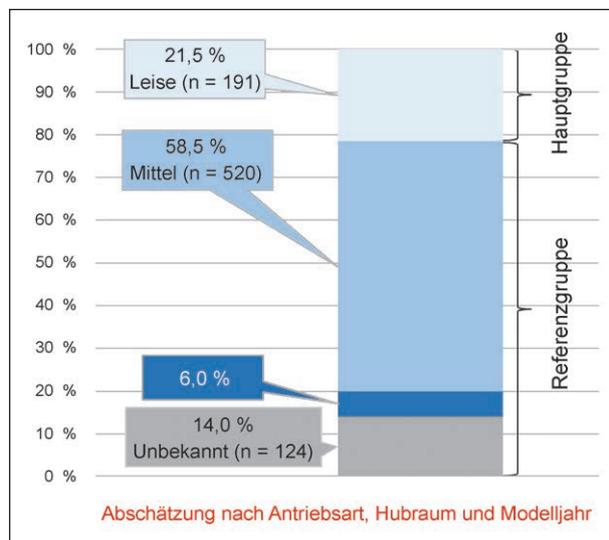


Bild 86: Standgeräusch der Fahrzeuge

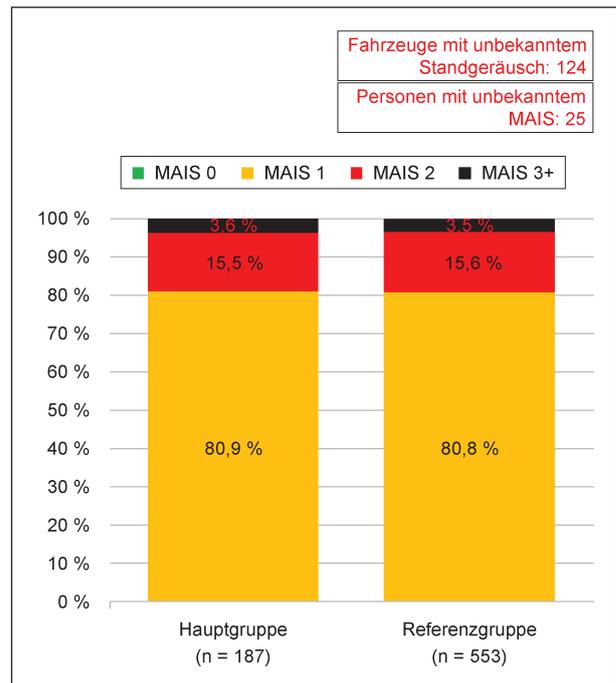


Bild 88: Verletzungsschwere des Fußgängers

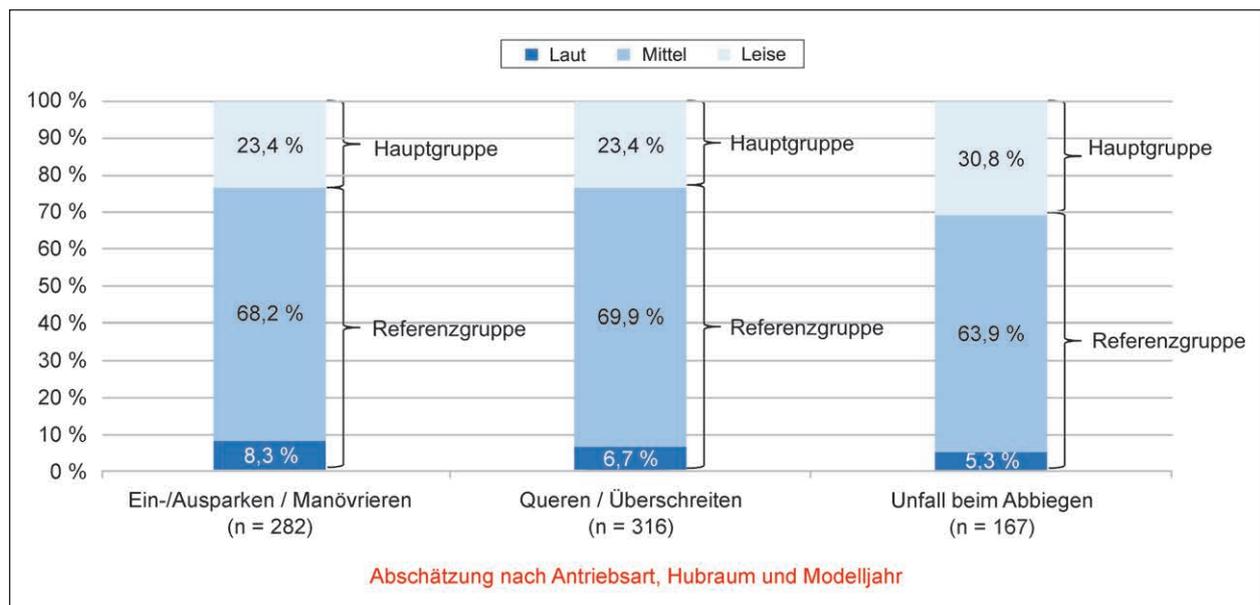


Bild 87: Standgeräusch in Abhängigkeit von der Unfallsituation

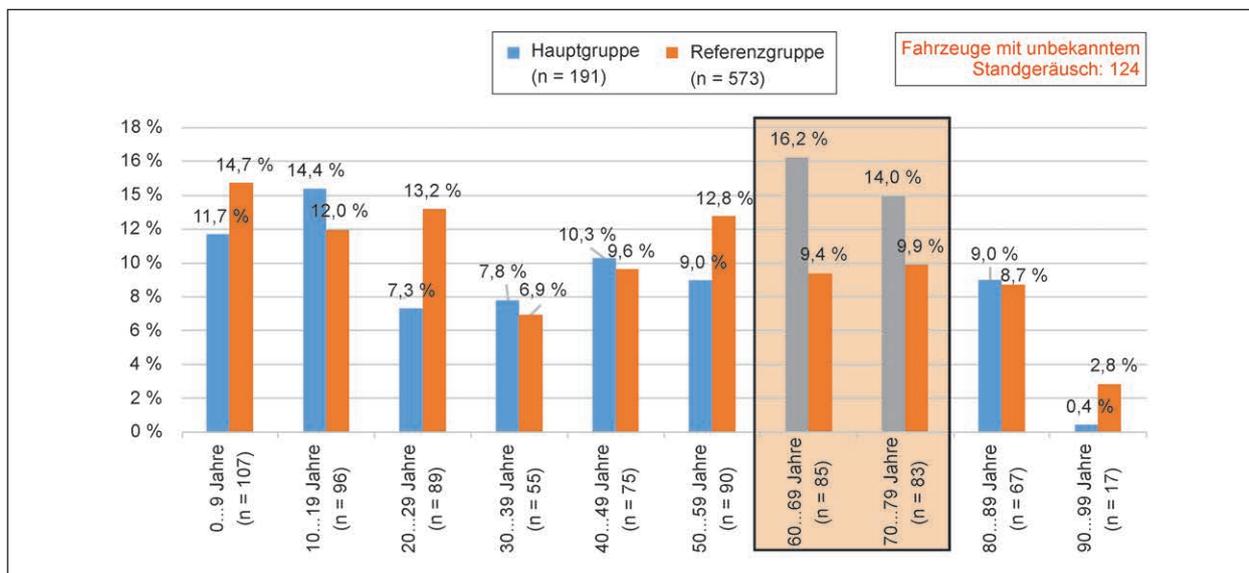


Bild 89: Alter des Fußgängers

Es zeichnen sich keine Unterschiede zwischen der Haupt- und Referenzgruppe ab. Dies ist nachvollziehbar, da die Verletzungsschwere eines Fußgängers maßgeblich von der Kollisionsgeschwindigkeit bestimmt wird, die in allen Fällen bei maximal 30 km/h liegt. Das gesamte Unfallkollektiv ist also recht homogen, was die Geschwindigkeiten angeht. Bild 89 zeigt die Verteilung des Fußgängeralters in den beiden Gruppen.

Auffällig ist dabei, dass die Fußgänger der Altersgruppen 60...69 Jahre und 70...79 Jahre tendenziell häufiger von leiseren Fahrzeugen erfasst wurden.

5.8.6 Verletzungsrisikofunktion

Mit den GIDAS-Daten ist es nicht möglich vorherzusagen, wie viele Unfälle (mehr) passieren würden, wenn zukünftig mehr Fahrzeuge mit deutlich geringeren Antriebsgeräuschen im Verkehr unterwegs sind. Allerdings lässt sich mithilfe von Verletzungsrisikofunktionen ermitteln, wie hoch die zu erwartende Verletzungsschwere von Unfallbeteiligten ausfällt, wenn sich beispielsweise die Unfallschwere in Form der Kollisionsgeschwindigkeit ändern würde.

Da Blinde die Entscheidung zum Überschreiten einer Straße anhand der Fahrzeuggeräusche treffen müssen, ist davon auszugehen, dass sie bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor aufgrund deren Geräusch vom Überqueren absehen, wenn das Fahrzeug aufgrund des präsenten Antriebsgerä-

ches wahrnehmbar ist. Wird nun dieses konventionelle Fahrzeug durch ein Elektrofahrzeug ersetzt, fällt das Antriebsgeräusch weg und ein gleich schnelles Fahrzeug erscheint ggf. weiter entfernt. Im Umkehrschluss sind schnellere Elektrofahrzeuge ähnlich laut wie langsame konventionelle Pkw, wodurch ein erhöhtes Risiko für Kollisionen mit höheren Kollisionsgeschwindigkeiten wahrscheinlich ist.

Verletzungsrisikofunktionen werden häufig durch logistische Regressionsverfahren berechnet. Bei den logistischen Regressionen werden retrospektive Unfall- und Verletzungsdaten verwendet, um geeignete Verletzungsrisikofunktionen zu erzeugen. Informationen über die Erstellung und ausführliche Beschreibungen finden sich unter anderem in Quelle [24].

Die Vorteile von Verletzungsrisikofunktionen liegen in erster Linie in ihrer guten Anwendbarkeit und der damit verbundenen Ablesbarkeit. Zudem lassen sich mehrere unabhängige Variablen in dem Modell betrachten, wodurch die Bild von Korrelationen verschiedener Variablen möglich ist.

Da das Alter einen signifikanten Einfluss auf die Verletzungsschwere des Fußgängers besitzt, wurden multivariate Modelle für verschiedene Altersklassen berechnet. Allerdings konnten nur Verletzungsrisikofunktionen für Erwachsene (15-60 Jahre) und ältere Menschen (über 60 Jahre) erstellt werden. Für Kinder (0-14 Jahre) sind in GIDAS zu

wenige Datensätze verfügbar, um robuste Modelle zu erstellen.

Die folgenden Verletzungsrisikofunktionen geben für Fußgänger in frontalen Fahrzeuganprallen die Wahrscheinlichkeit an, sich abhängig von der Kollisionsgeschwindigkeit des Fahrzeuges eine Verletzung mit einem Abbreviated Injury Scale (AIS) von mindestens 2 zuzuziehen. Nähere Informationen zum AIS können in der Tabelle im Anhang 5 nachgelesen werden.

Für den Anprall eines Fußgängers am Fahrzeugheck lassen sich keine geeigneten Verletzungsrisikofunktionen erzeugen, da bei dieser speziellen Anprallkonstellation die Verletzungsschwere kaum von der Kollisionsgeschwindigkeit abhängt. In der Regel geschehen diese Unfälle immer bei sehr geringen Geschwindigkeiten und die Verletzungsschwere des Fußgängers ist eher vom Alter der Person sowie der Kinematik (häufig Sturz auf die Fahrbahn) und den betroffenen verletzten Körperregionen abhängig.

Die meisten Unfälle im Geschwindigkeitsbereich bis 30 km/h ereignen sich jedoch an der Fahrzeugfront, insbesondere beim Abbiegen und Queren/Überschreiten.

Zum besseren Verständnis von Bild 90 folgt nun ein Ablesebeispiel, welches in genanntem Bild mithilfe von roten Linien dargestellt wurde:

- Bei Erwachsenen (blaue Kurve) beträgt die Wahrscheinlichkeit, sich bei einem Frontalanprall mit einer Kollisionsgeschwindigkeit von 30 km/h mindestens eine Verletzung mit einem AIS2 oder höher zuzuziehen, ca. 35 %.

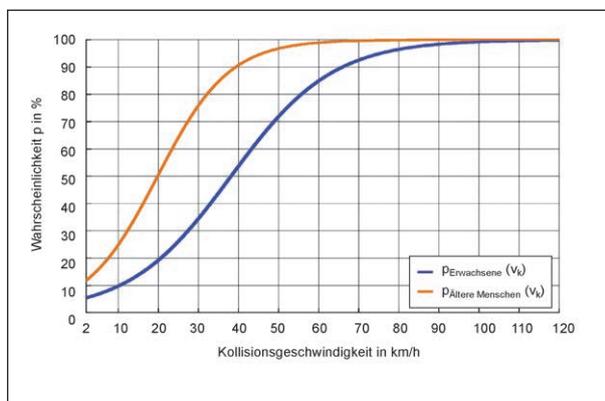


Bild 90: Verletzungsrisikofunktion für Fußgänger in Frontalanprallen inkl. Ablesebeispiel

- Bei älteren Menschen (orangene Kurve) beträgt die Wahrscheinlichkeit, bei einem Frontalanprall mit einer Kollisionsgeschwindigkeit von 30 km/h mindestens eine Verletzungsschwere von MAIS2 zu erleiden, ca. 75 %.

Bei der Interpretation der Verletzungsrisikofunktion ist zu bemerken, dass die Fahrzeugflotte in GIDAS im Durchschnitt im Jahre 2001 zugelassen wurde und dass in GIDAS ausschließlich Unfälle mit mindestens einer verletzten Person erhoben werden.

5.8.7 Analyse eines GIDAS-Beispielfalles

Aufgrund der Erkenntnisse aus der Analyse der Standgeräusche in Abhängigkeit von der Unfallsituation (siehe Bild 87) wird ein Unfall beim Abbiegen betrachtet, bei welchem ein leiseres Fahrzeug (nach Definition in Kapitel 5.8.5) mit einem Fußgänger kollidierte.

Bild 91 zeigt die Unfallskizze, anhand der der Unfallablauf beschrieben werden kann. Es ist zu erkennen, dass der Fußgänger (hier als Beteiligter 02 bezeichnet), aus Richtung Nordost in Richtung Südwest lief und die Katharinenstraße queren wollte. Der Pkw (Beteiligter 01) befährt die Alaunstraße in nordöstlicher Richtung und hat das Ziel, aus seiner Sicht nach links, in Richtung Nordwesten abzubiegen. Dabei übersieht er den Beteiligten 02 und es kommt zur Kollision.

Bevor es zu der Unfallsituation kommt steht der Beteiligte 01, da er die Vorfahrt des Gegenverkehrs gewähren musste. Da er sich somit während des Unfalleinlaufes noch im Anfahrprozess befindet,



Bild 91: Unfallskizze Beispielfall (Quelle [25])

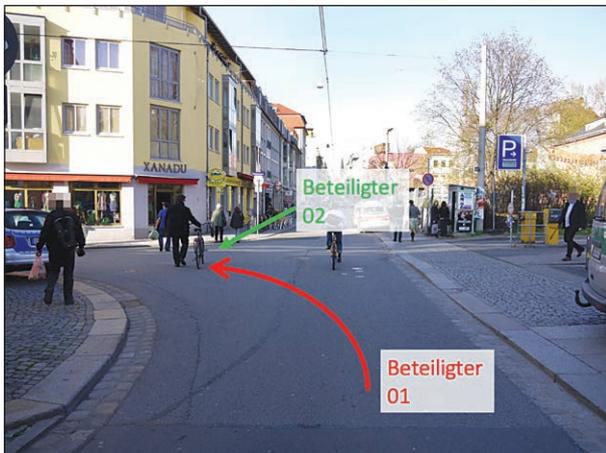


Bild 92: Blick aus Richtung des Beteiligten 01 (Quelle [25])

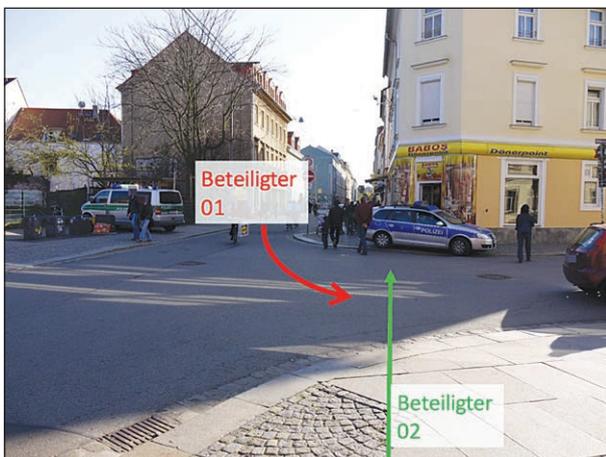


Bild 93: Blick aus Richtung des Beteiligten 02 (Quelle [25])

hat er eine Kollisionsgeschwindigkeit von lediglich 5 km/h. Beteiligter 02 zieht sich bei der Kollision leichte Verletzungen am rechten Ellbogen zu. Beteiligter 01 bleibt unverletzt. Bild 92 zeigt beispielhaft die Perspektive des Beteiligten 01 während der Annäherung an die Kreuzung.

Zum Unfallzeitpunkt befanden sich sehr viele Menschen in der näheren Umgebung der Kreuzung wodurch die Verkehrssituation unübersichtlich war.

In Bild 93 lässt sich die Laufrichtung des Beteiligten 02 nachvollziehen.

Bei dem Fahrzeug des Beteiligten 01 handelt es sich um einen Ford Fiesta 1.4 Ghia aus dem Jahre 2002. Das Modell wird bereits seit dem Jahr 2001 im Markt vertrieben. Der Ford Fiesta war mit einem Benzinmotor ohne Direkteinspritzung mit einem Hubraum von 1.388 ccm ausgestattet. Aufgrund der aufgeführten Eckdaten handelt es sich im Beispielfall nach den in Für die Auswertungen musste zu-



Bild 94: Leiseres Fahrzeug, hier: Ford Fiesta (Quelle [25])

nächst definiert werden, welcher Standgeräuschpegel den jeweiligen Fahrzeugen zugeordnet werden kann. Die Standgeräuschpegel von Kraftfahrzeugen werden in Deutschland hinter dem Fahrzeug gemessen. Da allerdings in den meisten Fällen der Standgeräuschpegel vor dem Fahrzeug relevant ist, ist der informative Gehalt dieses Messwertes für das zu bearbeitende Projekt nicht ausreichend.

Aus diesem Grund wurde eine Methode erarbeitet, bei der der Standgeräuschpegel im vorderen Fahrzeugbereich in Abhängigkeit vom Hubraum, die Antriebsart und dem Jahr der Markteinführung des Fahrzeuges abgeschätzt werden kann. Die Zuordnung ist in Tabelle 22 dargestellt.

Es kommt hinzu, dass das Geräuschniveau an der Kreuzung hoch war, aufgrund der zahlreichen Passanten. Dies senkte vermutlich die Wahrnehmung des Fahrzeuges für den Fußgänger zusätzlich.

6 Ergebnisanalyse und Zusammenfassung

Dieses Projekt liefert einen Beitrag zum Verständnis des Zusammenhangs zwischen Stationär-Geräuschen und deren Wahrnehmbarkeit im Hinblick auf eine mögliche Gefährdung von Fußgängern. Ziel war die Ermittlung, ob ein zusätzliches Stationär-Geräusch für die Sicherheit und für die Erkennung eines elektrisch angetriebenen Fahrzeugs hilfreich ist und die Klärung welche notwendigen Geräuscheigenschaften dieser Stationär-Geräusche vorteilhafter bei der Erkennung sind. Die auditive Wahrnehmung wurde für drei sehr unterschiedliche Verkehrssituationen bestimmt.

In einem ersten Schritt dieses Projektes wurden gemeinsam mit blinden und sehbeeinträchtigten Personen drei sicherheitskritische Situationen identifiziert, in denen die Verwendung eines Stationär-Geräusch einen Vorteil bringen könnte. Daraufhin wurde ein Soundsyntheseframework geschaffen mit dem Zusatzgeräusche erzeugt werden konnten. Für diese drei Situationen wurden akustische Aufnahmen durchgeführt und so aufbereitet, sodass mithilfe von Hörversuchen im multimodalen Messlabor der TU Dresden unter Verwendung der Wellenfeldsynthese, die jeweilige Wahrnehmbarkeit der unterschiedlichen Geräusche untersucht werden konnte.

Zum Nachweis der Tauglichkeit für den Einsatz in realen Situationen wurde ein Feldtest durchgeführt. Darin konnte der Nutzen eines zusätzlichen Stationär-Geräusches praktisch untersucht werden.

Als erste Situation wurde die Fahrzeugaußengeräuscherkennung für einen Fußgängerüberweg bestimmt (vgl. Kapitel 5.6.3). Ermittelt wurde der Unterschied in Detektierbarkeit zwischen Elektrofahrzeugaußengeräuschen ohne Stationär-Geräuschen und mit Stationär-Geräuschen. Dabei wurden die Stationär-Geräuschparameter systematisch variiert. Es wurden Geräusche in zwei verschiedenen Pegelstufen generiert und auch ein Pegelsprung zwischen Fahrgeräusch und Stationär-Geräusch erzeugt. Des Weiteren wurden unterschiedliche Frequenzsprünge erstellt. Da die tonalen Komponenten des Fahrgeräuschs jeweils einen Abstand von 30 Hz aufweisen, wurde die prozentuale Frequenzänderung auf diesen Abstand bezogen. So bedeutet ein Frequenzsprung von 100 %, dass die mittlere tonale Komponente 30 Hz (100 % Frequenzabstand) hin zu tieferen Frequenzen verschoben ist. 50 % bedeutet somit einen Frequenzsprung von 15 Hz. Auch der Frequenzabstand der tonalen Komponenten zueinander wurde im Stationär-Geräusch variiert. Da der Abstand zweier tonalen Komponenten zueinander eine Rauigkeit erzeugt, wird diese Änderung als „Rauigkeitsänderung“ bezeichnet. So wurde der Abstand der tonalen Komponenten im Stationär-Geräusch auf 30 Hz belassen (wie Fahrgeräusch) oder auch auf 20 Hz oder 10 Hz reduziert. Alle hier beschriebenen Parameter wurden miteinander kombiniert, sodass insgesamt 58 verschiedene Variationen entstanden sind.

Des Weiteren wurden zwei verschiedene Fahrgeräusche verwendet, damit sowohl UN-Fahrgeräusche als auch US-konforme Geräusche abgedeckt

werden konnten. Für diese Situation wurde sowohl das Anfahren als auch das Anhalten untersucht. Es zeigt sich, dass ein hoher Pegel zu besseren Detektionszeiten führt. Auch ein großer Frequenzsprung zwischen Fahrgeräusch und Stationär-Geräusch zeigt signifikant bessere Detektionszeiten. So wurde im Labor ein Geräusch mit Pegelsprung, Frequenzsprung 50 % und Rauigkeitsänderung 20 Hz im Mittel 0,31 s früher detektiert als ein Geräusch mit demselben Pegel aber ohne Stationär-Geräusch. Die statistische Auswertung zeigt, dass ein höherer Pegel signifikant früher detektiert wird, aber ein Pegelsprung noch besser als der hohe Pegel für die Detektion ist. Des Weiteren zeigt sich, dass 100 % Frequenzsprung signifikant besser detektierbar ist als kein Frequenzsprung. Werden die einzelnen Kombinationen im Vergleich zu Geräuschen ohne Stationär-Geräusch verglichen, zeigen sich, dass Geräusche mit Frequenzsprung 50 % oder 100 % in Kombination mit einer Rauigkeitsänderung von 30 Hz signifikant besser detektierbar sind. Dieses Ergebnis lässt sich anhand der Ergebnisse des Feldversuchen für die Situation „Anfahren“ nicht eindeutig bestätigen, aber es zeigt sich ebenfalls eine Tendenz, dass diese Kombination eine frühere Detektion (0,32 s) ermöglicht.

Bei der Anhalten-Situation zeigt sich, dass Geräusche mit einem Frequenzsprung von 100 % signifikant früher detektiert werden können, als Geräusche mit 50 % oder 0 %. Allerdings zeigt sich auch, dass alle Stationär-Geräuschkombinationen signifikant später detektiert werden als Geräusche ohne Stationär-Geräusch. Einzig eine Geräuschkombination (Frequenzsprung 100 % mit Rauigkeitsänderung 30 Hz) zeigt keine signifikanten Unterschiede im Vergleich zu einem Geräusch ohne Stationär-Geräusch. Im Feldversuch zeigt sich besonders bei dieser Situation größere Differenzen in der Detektion zwischen Geräuschen ohne Stationär-Geräusch und mit Stationär-Geräusch und Frequenzsprung 100 % und Rauigkeitsänderung 30 Hz. Das Geräusch mit Stationär-Geräusch wurde im Mittel 0,62 s früher detektiert. Die gleiche Tendenz zeigt sich auch bei dem US-Geräusch. Hier wurde das Geräusch mit Stationär-Geräusch im Mittel 0,48 s früher detektiert.

Bei der Parkplatzsituation zeigen sich die gleichen Ergebnisse, wie bei den Situationen zuvor: Höherer Pegel bzw. Pegelsprung, höherer Frequenzsprung und Rauigkeitsänderung 30 Hz sind vorteilhaft bei der Detektion. Im direkten Vergleich mit Geräu-

schen ohne Stationär-Geräusch können Geräusche mit Rauigkeitsänderung 30 Hz und Frequenzsprung (0 %, 50 % und 100 %) als auch die Kombination Frequenzsprung 100 % mit Rauigkeitsänderung 10 Hz früher detektiert werden. Das UN-Geräusch mit Pegelsprung, Frequenzsprung 100 % und Rauigkeitsänderung 10 Hz konnte 1,11 s früher detektiert werden, als das Geräusch mit dem entsprechenden Pegel ohne Stationär-Geräusch. Neben der Detektion sollten die Probanden im Labor auch die Fahrzeuge in den jeweiligen Parklücken detektierten. Hier zeigt sich, dass die Geräusche gemittelt über alle Parklücken keine signifikanten Unterschiede in der Lokalisierbarkeit aufweisen. Auch im Feldversuch zeigt sich die Tendenz, dass das UN-Geräusch mit Frequenzsprung 100 % und Rauigkeitsänderung 30 Hz im Mittel 0,32 s früher detektiert werden konnte als das Geräusch ohne Stationär-Geräusch.

Die Ergebnisse der Situation Kreuzung zeigen, dass alle Geräusche mit Stationär-Geräusch signifikant früher detektiert werden, das Geräusch ohne Stationär-Geräusch. Dies ist damit zu begründen, dass bei der in dieser Studie verwendeten Situation eine geringere Distanz zwischen Proband und Fahrzeug vorliegt und somit der Übergang zwischen Stationär-Geräusch und Fahrgeräusch viel deutlicher wahrzunehmen ist. Der größte signifikante Unterschied zeigt sich zwischen der Detektion von dem UN-Geräusch ohne Stationär-Geräusch und dem Geräusch mit Pegelstufe 2, Frequenzsprung 100 % und Rauigkeitsänderung 10 Hz (0,52 s).

Neben den Detektions- und Ortungsversuchen wurden die Variationen der Stationär-Geräusche ebenfalls hinsichtlich der Lästigkeit in einem Wahrnehmungsversuch untersucht. Wie zu erwarten, wurden die reinen Stationär-Geräusche mit Pegelstufe 1 signifikant weniger lästig bewertet als Geräusche mit Pegelstufe 2. Bei den reinen Stationär-Geräuschen bedeutet ein größerer Frequenzsprung eine niedrigere Frequenz. Geräusche mit einem Frequenzsprung 50 % und 100 % wurden signifikant weniger lästig bewertet als Geräusche mit Frequenzsprung 0 %. Des Weiteren wurden Geräusche mit Rauigkeitsänderung 20 Hz signifikant weniger lästig bewertet als Geräusche mit Rauigkeitsänderung 10 Hz. Diese Ergebnisse zeigten sich sowohl bei den UN- als auch bei den US-Geräuschen. Bei den kombinierten Geräuschen zeigten sich bezüglich der Pegel die gleichen Ergebnisse. Der Frequenzsprung zeigte bei der Lästigkeit keine signifikanten Einflüsse. Allerdings wurden Geräusche mit Rauigkeitsänderung 20 Hz signifikant we-

niger lästig beurteilt als Geräusche mit Rauigkeitsänderung 30 Hz.

Fahrzeuge mit elektrischen Antriebskomponenten können ohne zusätzlich abgestrahlte Außengeräusche beim rein elektrischen Fahren sehr leise sein. Eine Vielzahl an Studien unter Labor- und praktischen Verkehrsbedingungen belegt die deutlich verringerte Hörbarkeit solcher Fahrzeuge. Für die Frage, ob ein Stationär-Geräusch die Sicherheit im Straßenverkehr besonders für schwächere Verkehrsteilnehmer verbessern würde, wurde bisher noch kaum behandelt. In der hier vorliegenden Untersuchung wurden insbesondere bislang wenig betrachtet Verkehrssituationen (Anhalten, Anfahren) untersucht. Einige Stationär-Geräusche zeigen sowohl bei Normalsehenden als auch bei blinden/sehbeeinträchtigten Personen signifikante Effekte bezüglich der Detektionsfähigkeit. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass nicht generell jedes Stationär-Geräusch in jeder Fahrsituation für eine bessere Detektion führt. In Situationen, in denen sich der Proband nahe am Fahrzeug befindet, ist die Anwesenheit eines zusätzlichen Stationär-Geräusches sinnvoll und führt zu einer früheren Detektion. Für Situationen, die einen größeren Abstand (z. B. Zebrastreifen oder Parkplatz) zwischen Proband und Fahrzeug aufweisen ist eine Differenzierung dieser Aussage nötig. Sowohl in den Laboruntersuchungen, als auch im anschließenden Feldversuch hat sich gezeigt, dass es Stationär-Geräusch Kombinationen gibt, die eine frühere Detektion ermöglichen. Des Weiteren kann ein ungeeignetes Stationär-Geräusch auch zu einer späteren Detektion führen. Es hat sich gezeigt, dass deutliche Unterschiede zwischen Fahr- und Stationär-Geräusch z. B. durch Pegelsprung oder Frequenzsprung die Detektionsfähigkeit begünstigen.

Diesbezüglich wächst die abschließende Anregung einer eingehenderen Untersuchung dieser Phänomene. Es wäre wünschenswert, eine breitere Geräuschpalette hinsichtlich der hier gefundenen Ergebnisse zu untersuchen, um auch im Kontext der nationalen und internationalen Regulation bezüglich eines künstlich erzeugten Außengeräusches von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen Aussagen zu einem zusätzlichen Stationär-Geräusch zu tätigen und Anforderungen abgrenzen zu können.

Neben den Hörversuchen wurden für alle Auswertungen der Einfluss bestehender Warnsysteme – Kollisionsgeschwindigkeiten/Verletzungsschwere ausgewertet. Diesbezüglich wurden Daten der

GIDAS-Datenbank verwendet. Der erstellte Masterdatensatz umfasst ausschließlich Unfälle zwischen Pkw und Fußgängern, bei denen sich der Fußgänger verletzt. Er bildet nach durchgeführter Gewichtung die datenseitige Grundlage der durchgeführten Studie.

Mithilfe der Betrachtungen in Kapitel 5.8.3 konnten grundlegende Informationen über die Pkw-Geschwindigkeiten in den verschiedenen Szenarien zusammengetragen werden. Eine Erkenntnis liegt darin, dass die Kollisionsgeschwindigkeiten im Unfallszenario „Ein-/Ausparken/Manövrieren“ in den meisten Fällen über der Ausgangsgeschwindigkeit liegt (beteiligte Pkw werden beschleunigt). Sowohl beim Queren/Überschreiten als auch beim Abbiegen ist die Kollisionsgeschwindigkeit niedriger als die Ausgangsgeschwindigkeit, weil hier die Fahrzeugführer vor dem Anprall oft noch verzögerten.

In Kapitel 5.8.4 wurden die einzelnen Unfallszenarien detailliert betrachtet. So wurde bspw. dargestellt, aus welchen Konfliktsituationen die jeweiligen Unfallszenarien häufig entstehen. Zudem wurden die Einflüsse verschiedener Assistenzsysteme dargestellt. Über die Auswertung der Verletzungsschwere der Fußgänger konnte festgestellt werden, dass diese nahezu unabhängig von der Unfallsituation ist.

Im neuesten Abzug von GIDAS (Juli 2016) sind noch keine Elektrofahrzeuge in den relevanten Unfallsituationen vorhanden. Deshalb wurde im Rahmen von Kapitel 5.8.5 eine Definition entwickelt, die die Zuordnung von Pkw in Gruppen verschiedener Standgeräusch-Pegel mit vorhandenen Daten wie Hubraum, Antriebsart und Jahr der Modelleinführung ermöglicht. Diese Definition beruht jedoch auf Annahmen und stellt lediglich eine Abschätzung dar. Mithilfe dieser Herangehensweise ließ sich beispielsweise ermitteln, dass der Anteil der leiseren Fahrzeuge in Abbiegeunfällen etwas höher war als in den anderen Szenarien. Zudem konnte ein Einfluss des Alters der Fußgänger aufgezeigt werden. Demnach kollidieren ältere Fußgänger anteilig häufiger mit leiseren Fahrzeugen. Es ist anzumerken, dass die meisten Erkenntnisse auf univariaten Analysen beruhen. Somit sind weitere, sich überlagernde bzw. gegenseitig beeinflussende Aspekte denkbar, die hier jedoch nicht explizit untersucht wurden (bspw. Fahrzeug- und Fahrerpopulation, Komplexität der Unfallstellen, Verkehrstechnik/Infrastruktur usw.).

In Kapitel 5.8.6 wurde eine Verletzungsrisikofunktion für den Anprall eines Fußgängers an der Fahrzeugfront dargestellt. Mit dieser lässt sich abschätzen, wie sich die Wahrscheinlichkeit, dass sich der Fußgänger eine Verletzung mit einem AIS2 oder höher zuzieht, abhängig von der Kollisionsgeschwindigkeit ändert. Daran lässt sich folglich auch abschätzen wie schwer sich Fußgänger verletzen würden, wenn die akustische Wahrnehmung durch elektrische Antriebe sinkt und sich damit die Wahrscheinlichkeit höherer Kollisionsgeschwindigkeiten erhöht. Denn wird ein konventionelles Fahrzeug durch ein Elektrofahrzeug ersetzt, fällt das Antriebsgeräusch weg und ein gleich schnelles Fahrzeug erscheint ggf. weiter entfernt. Dadurch besteht die Gefahr, dass eine blinde Person auf die Straße tritt, um diese überqueren zu wollen.

Kapitel 5.8.7 veranschaulicht eine typische Unfallsituation. Die Auswahl des Beispielfalles wurde auf Basis der Erkenntnisse aus Kapitel 5.8.5 vorgenommen. Somit wurde ein Fall beleuchtet, in welchem ein abbiegendes Fahrzeug im Anfahrvorgang einen Fußgänger erfasst.

Die Datenanalyse vermittelt ein grundsätzliches Verständnis für Fahrzeug-Fußgänger-Anpralle im Niedriggeschwindigkeitsbereich. Sie bildet damit eine gute Basis für weitere Betrachtungen hinsichtlich elektrisch angetriebener Fahrzeuge im Niedriggeschwindigkeitsbereich.

Literatur

- [1] R. HANNA: Incidence of Pedestrian and Bicyclist Crashes by Hybrid Electric Passenger Vehicles. National Highway Traffic Safety Administration
- [2] M. L. HASTINGS A., POLLARD J. K., ZUSCHLAG M. & STEARNS GARAY-VEGA: Quieter Cars and the Safety of Blind Pedestrians: Phase 1. National Highway Traffic Safety Administration, 2010
- [3] HASTINGS, A. et al.: Quieter Cars and the Safety of Blind Pedestrians, Phase 2: Development of Potenzial Specifications for Vehicle Countermeasure Sounds. Dept. of Transportation, 2011
- [4] UNECE: Regulation 138: „Uniform provisions concerning the approval of

- Quiet Road Transport Vehicles with regard to their reduced audibility (QRTV)“ <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2016/R138e.pdf> (last access: 06.April 2017)
- [5] S. KERBER: Wahrnehmbarkeit von Fahrzeugaußengeräuschen in Hintergrundgeräuschen – Psychoakustische Beurteilungen und modellbasierte Prognosen, TU München, 2008
- [6] J. GROSSE: Vergleich der Detektionsschwellen eine herrannahenden konventionellen Fahrzeuges mit eeine Elektrofahrzeug in natürlichen und dynthetischen Maskierern. Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, 2012
- [7] J. GROSSE, R. WEBER, and S. van de PAR: Comparison of detection threshold measurements and modeling for approaching electric cars and conventional cars presented in traffic and pink noise. In: Proceedings of Meetings on Acoustics, 2013, vol. 19, no. 1, p. 050192.
- [8] E. PARIZET, W. ELLERMEIER, and R. ROBART: Auditory warnings for electric vehicles: Detectability in normal-vision and visually-impaired listeners
- [9] E. PARIZET, R. ROBART, W. ELLERMEIER, K. JANSSENS, F. BIANCARDI, M. HAIDER, D. QUINN, and J.-C. CHAMARD: Warning sounds for electric vehicles. In: Fisita World Automotive Congress 2014, 2014, p. 1
- [10] E. PARIZET, R. ROBART, P. PONDROM, J.-C. CHAMARD, G. BAUDET, D. QUINN, K. JANSSENS, and M. HAIDER: Additional efficient warning sounds for electric and hybrid vehicles. In: Transport Research Arena (TRA) 5th Conference: Transport Solutions from Research to Deployment, 2014
- [11] M. E. ALTINSOY: The Detectability of Conventional, Hybrid and Electric Vehicle Sounds by Sighted, Visually Impaired and Blind Pedestrians. In: Proceedings of Internoise 2013, Innsbruck, Austria, 2013
- [12] M. E. ALTINSOY: Auditive Wahrnehmung und Beurteilung von instationaeren Fahrzeug-aussengeraeuschen, LAERMBEKAEMPFGUNG, vol. 9, no. 2, 2014
- [13] M. E. ALTINSOY, J. LANDGRAF, R. ROSENKRANZ, M. LACHMANN, K. HAGEN, C. SCHULZE, and B. SCHLAG: Wahrnehmung und Bewertung von Fahrzeugaußengeräuschen durch Fußgänger in verschiedenen Verkehrssituationen und unterschiedlichen Betriebszuständen, BASt, 82.0578, 2012
- [14] M. E. ALTINSOY, et al.: Investigations on the Detectability of Synthesized Electric Vehicle Sounds – Vehicle Operation: Approaching at 10 km/h. In: Forum Acousticum 2014, Krakow, 2014
- [15] M. E. ALTINSOY, J. LANDGRAF: Perceptibility of Vehicle Exterior Sounds – Balance between Information and Noise, ATZ Worldwide, 116 (9), pp. 60–65, 2014
- [16] S. KERBER: Bedeutung des Fahrzeugaußengeräusches im urbanen Verkehr für die Interaktion Fußgänger-Fahrzeug, ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift, Ausgabe Nr.: 2006-08, 2006
- [17] K. YAMAUCHI, D. MENZEL, M. TAKADA, K. NAGAHATA, S. IWAMIYA, and H. FASTL: Psychoacoustic examination of feasible level of additional warning sound for quiet vehicles. In: Acoustical Science and Technology, vol. 36, no. 2, pp. 120–125, 2015
- [18] M.E. ALTINSOY und J. LANDGRAF: Wahrnehmbarkeit von Fahrzeugaußengeräuschen, ATZ Automobiltechnische Zeitschrift, Nr. 09, 2014
- [19] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): Richtlinien für Markierung von Straßen RMS. Teil 1: Abmessungen und geometrische Anordnung von Markierungszeichen. Ausgabe 1993, 1993
- [20] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2007): Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen (RASt 06)
- [21] R. LERCH, G. SESSLER, D. WOLF: Technische Akustik: Grundlagen und Anwendungen. Springer-Verlag, 2009

- [22] M. GREEN: How long does it take to stop? Methodological analysis of driver perception-brake times. *Transportation human factors*, 2:195-216, 2000
- [23] VUFO GmbH: German In-depth Accident Study, 2016. [Online]. Available: <http://www.gidas.org>. [Zugriff am 21.08.2017]
- [24] H. LIERS und F. SPITZHÜTTL: Methodik zur Erstellung von Verletzungsrisikofunktionen aus Realunfalldaten [noch nicht veröffentlicht], o. V., Dresden, 2016
- [25] GIDAS Datenbank: Datenbank GIDAS, 2017
- [26] Verordnung (EU) Nr. 540/2014 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. April 2014 über den Geräuschpegel von Kraftfahrzeugen und von Austauschschalldämpferanlagen sowie zur Änderung der Richtlinie 2007/46/EG und zur Aufhebung der Richtlinie 70/157/EWG Text von Bedeutung für den EWR
- [27] L. STEINBACH, M. E. ALTINSOY, R. ROSENKRANZ: Evaluation of Multiple Electric Vehicle Sources and New Concepts Regarding Speed-Dependency, 300 Technical Report, SAE Technical Paper, 2017
- [28] L. STEINBACH, S. ATAMER, M. E. ALTINSOY: Evaluation of electric vehiclesounds, new concepts regarding speed-dependency and prediction of the warning effect. In: *Proceedings of Meetings on Acoustics 173EAA*, volume 30, ASA, p. 040006
- [29] L. STEINBACH, M. E. ALTINSOY: "Lästigkeitsbewertung von Verkehrssituationen im Hinblick auf unterschiedliche Antriebskonzepte", DAGA 2016 – 42nd German Annual Conference on Acoustics (2016)
- [30] L. STEINBACH, M. E. ALTINSOY, R. ROSENKRANZ: "Elektromobilität: Angepasste Geschwindigkeits-Pegelskalierung erhöht die Sicherheit", DAGA 2017 – 43rd German Annual Conference on Acoustics

Bilder

- Bild 1: Methodik des Vorgehens
- Bild 2: Überblick über sicherheitskritische Situationen aus Sicht der Blinden/Sehbeeinträchtigten
- Bild 3: Überblick über die gewählten sicherheitskritischen Situationen
- Bild 4: Ergebnisdarstellung der Anhaltesituation aus BASt-Projekt-Nr.: 82.0578/2012 und Spektrogramme der verwendeten Stimuli ohne Hintergrundgeräusch [13]
- Bild 5: Spektrum, Pegel und Drehzahl über der Zeit eines beschleunigenden Fahrzeugs
- Bild 6: Ortungsfehler für Parksituation relativ zur Breite einer Parklücke
- Bild 7: Leistungsdichtespektrum des Hintergrundgeräuschs Bundesstraße 55 dB(A)
- Bild 8: Übertragungsfunktion eines Soundgenerators von Delphi (Gemessen im reflexionsarmen Raum in 2 m Abstand)
- Bild 9: Zur Erkennung des Betriebszustandes in zwei Sekunden notwendige Frequenzerhöhung über der Grundfrequenz (für Aufwärtssweeps)
- Bild 10: Minimalpegelanforderungen an ein Zusatzgeräusch als Maximalpegel bei Vorbeifahrt an einem Messmikrofon in 2 m Abstand vom Fahrzeugweg
- Bild 11: Theoretischer geschwindigkeitsabhängiger Pegelverlauf an der Position des Probanden, den ein von 0 auf 10 km/h anfahrendes Fahrzeug bzw. ein mit 10 km/h herannahendes Fahrzeug erzeugen würde, wenn sie bei 10 km/h den gleichen Pegel erzeugen [29]
- Bild 12: Schematische Struktur des Soundsyntheseframeworks
- Bild 13: Übersetzung der Fahrgeschwindigkeit in den Fahrzeugmodus (Fahrbetrieb, Stillstand, Rückwärtsfahren)
- Bild 14: Geschwindigkeits-Frequenz-Skalierung

- Bild 15: Tonale Komponenten des Fahrgeräuschs
- Bild 16: Amplitudenmodulation des Fahrgeräuschs bspw. für den Rückwärtsbetrieb
- Bild 17: Breitbandige Komponenten des Fahrgeräuschs
- Bild 18: Überblick über das gesamte Framework mit den einzelnen Modulen
- Bild 19: Steuerung der Parameter der Geräuschgenerierung für das Stationär-Geräusch
- Bild 20: Teststrecke auf der die Aufnahmen durchgeführt wurden
- Bild 21: Ausgewählte Entwurfssituation „Quartierstraße“ [20]
- Bild 22: Messaufbau für Situation 1 „Fußgängerüberweg“: zugewandte Straßenseite
- Bild 23: Messaufbau für Situation 1 „Fußgängerüberweg“: abgewandte Straßenseite
- Bild 24: Messaufbau für Situation 2 „Parkplatz“
- Bild 25: Messaufbau der Situation 3 „Kreuzung“: abbiegendes Fahrzeug aus entgegengerichteter Richtung
- Bild 26: Messaufbau der Situation 3 „Kreuzung“: abbiegendes Fahrzeug aus Blickrichtung des Probanden
- Bild 27: Messung Richtcharakteristik des Soundgenerators im Einbauzustand
- Bild 28: Übertragungsfunktionen des Soundgenerators im Einbauzustand für 12 Winkel in 30°-Abständen (DFT: 131072, 50 %, Han)
- Bild 29: Hintergrundstimulus 55 dB(A); FFT über der Zeit (links) und Mittelungsspektrum (rechts), DTF-Länge 4096
- Bild 30: Basis-Fahrgeräusch, FFT über der Zeit
- Bild 31: Algorithmus zur Szenengenerierung
- Bild 32: Maße der Übergangssituation von Situation 1
- Bild 33: Algorithmus zur Generierung der Positionsdaten für die Situation 1
- Bild 34: Maße der Parkplatzsituation
- Bild 35: Maße der Kreuzungssituation
- Bild 36: Mittlere Ruhehörschwelle aller Probanden (rechtes Ohr: rot, linkes Ohr: blau)
- Bild 37: Beispielhafte Darstellung des Versuchsaufbaus für ein anfahrendes Fahrzeug in Situation 1
- Bild 38: Beispielhafte Versuchsoberfläche des Hörversuchs Reaktionszeitmessung
- Bild 39: Darstellung der Ergebnisse für die Situation „Anfahren“ für alle UN-Geräusche
- Bild 40: Darstellung der Ergebnisse für die Situation „Anfahren“ für alle UN-Geräusche – getrennt für Blinde/Sehbeeinträchtigte und Sehende
- Bild 41: Darstellung der Ergebnisse für die Situation „Anfahren“ für alle US-Geräusche
- Bild 42: Darstellung der Ergebnisse für die Situation „Anfahren“ für alle US-Geräusche – getrennt für die zwei Gruppen
- Bild 43: Beispielhafte Darstellung des Versuchsaufbaus für ein anhaltendes Fahrzeug in Situation 1
- Bild 44: Darstellung der Ergebnisse für die Situation „Anhalten“ für alle UN-Geräusche
- Bild 45: Darstellung der Ergebnisse für die Situation „Anhalten“ für alle UN-Geräusche – getrennt für die Blinden/Sehbeeinträchtigten und Sehenden
- Bild 46: Darstellung der Ergebnisse für die Situation „Anhalten“ für alle US-Geräusche
- Bild 47: Darstellung der Ergebnisse für die Situation „Anhalten“ für alle US-Geräusche – getrennt für die Blinden/Sehbeeinträchtigten und Sehenden
- Bild 48: Darstellung des Versuchsaufbaus für ein ausparkendes Fahrzeug in Situation 2
- Bild 49: Detektionszeiten für die UN-Geräusche für die Situation „Parkplatz“
- Bild 50: Darstellung der Ergebnisse für die Situation „Parkplatz“ für alle UN-Geräusche – getrennt für die Gruppen

- Bild 51: Detektionszeiten für die US-Geräusche für die Situation „Parkplatz“
- Bild 52: Darstellung der Ergebnisse für die Situation „Parkplatz“ für alle US-Geräusche – getrennt für die Gruppen
- Bild 53: Ortungsfehler der UN-Geräusche in Abhängigkeit der Parklücken: Parklücke 1: grün, Parklücke 2: orange, Parklücke 3: blau
- Bild 54: Ortungsfehler der US-Geräusche in Abhängigkeit der Parklücken: Parklücke 1: grün, Parklücke 2: orange, Parklücke 3: blau
- Bild 55: Sinnbildliche Darstellung der Befragung nach der wahrgenommenen Richtung im Hörversuch
- Bild 56: Detektionszeiten für die UN-Geräusche für die Situation „Kreuzung“ gemittelt über alle Uhrzeiten, getrennt für die zwei Fahrtrichtungen X und Y
- Bild 57: Darstellung der Ergebnisse für die Situation „Kreuzung“ für alle UN-Geräusche aus X-Richtung – getrennt für die Uhrzeiten
- Bild 58: Detektionszeiten für die US-Geräusche für die Situation „Kreuzung“ gemittelt über alle Uhrzeiten, getrennt für die zwei Fahrtrichtungen X und Y
- Bild 59: Darstellung der Ergebnisse für die Situation „Kreuzung“ für alle US-Geräusche aus X-Richtung – getrennt für die Uhrzeiten
- Bild 60: Darstellung der Ortungsfehler in °-Schritten für die Situation „Kreuzung“ für alle UN-Geräusche aus X-Richtung – über alle Uhrzeiten gemittelt
- Bild 61: Darstellung der Ortungsfehler in °-Schritten für die Situation „Kreuzung“ für alle US-Geräusche aus X-Richtung – über alle Uhrzeiten gemittelt
- Bild 62: Versuchsoberfläche für die Lästigkeitsbewertung
- Bild 63: Lästigkeitsbewertungen der UN-Stationär-Geräusche ohne Fahrgeräusch
- Bild 64: Lästigkeitsbewertungen der US-Stationär-Geräusche ohne Fahrgeräusche
- Bild 65: Lästigkeitsbewertungen der UN-Stationär-Geräusche und Fahrgeräusch
- Bild 66: Lästigkeitsbewertungen der US-Stationär-Geräusche und Fahrgeräusch
- Bild 67: Durchführung des Feldtests für das an-fahrende Fahrzeug
- Bild 68: Reaktionszeiten der Situation „Anhalten“ im Feldversuch
- Bild 69: Reaktionszeiten der Situation „Anfahren“ im Feldversuch
- Bild 70: Reaktionszeiten der Situation „Parkplatz“ im Feldversuch
- Bild 71: Organisationsstruktur des GIDAS-Projektes
- Bild 72: Fallzahlen Unfallebene
- Bild 73: Gewichtung GIDAS
- Bild 74: Fallzahlen Beteiligteebene
- Bild 75: Verteilung der Ausgangsgeschwindigkeit
- Bild 76: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit
- Bild 77: Verteilung der Verletzungsschwere der Fußgänger
- Bild 78: Top 5 der Unfalltypen beim Queren/Überschreiten
- Bild 79: Verbau von Start-Stopp-Systemen in Queren- bzw. Überschreiten-Situationen
- Bild 80: Top 5 der Unfalltypen beim Ein-, Ausparken oder Manövrieren
- Bild 81: Verbaurate von Einparkhilfen in Ein-, Auspark- bzw. Manövrier-Situationen
- Bild 82: Verbaurate von Rückfahrkameras in Ein-, Auspark- bzw. Manövrier-Situationen
- Bild 83: Verbau von Start-Stopp-Systemen in Ein-, Auspark bzw. Manövrier-Situationen
- Bild 84: Top 5 der Unfalltypen beim Abbiegen
- Bild 85: Verbau von Start-Stopp-Systemen in Abbiege-Situationen
- Bild 86: Standgeräusch der Fahrzeuge

Bild 87: Standgeräusch in Abhängigkeit von der Unfallsituation

Bild 88: Verletzungsschwere des Fußgängers

Bild 89: Alter des Fußgängers

Bild 90: Verletzungsrisikofunktion für Fußgänger in Frontalanprallen inkl. Ablesebeispiel

Bild 91: Unfallskizze Beispielfall (Quelle [25])

Bild 92: Blick aus Richtung des Beteiligten 01 (Quelle [25])

Bild 93: Blick aus Richtung des Beteiligten 02 (Quelle [25])

Bild 94: Leiseres Fahrzeug, hier: Ford Fiesta (Quelle [25])

Tab. 8: Paarweise Vergleiche zwischen UN-Geräuschen ohne Stationär-Geräusch und den UN-Geräuschen mit Stationär-Geräusch und den einzelnen Parametervariationen für die Situation „Parkplatz“

Tab. 9: Signifikante Unterschiede zwischen Gruppe 1 und Gruppe 2 für die Detektion der UN-Geräusche für die Situation „Parkplatz“ über alle drei Parklücken gemittelt

Tab. 10: Paarweise Vergleiche zwischen US-Geräuschen ohne Stationär-Geräusch und den US-Geräuschen mit Stationär-Geräusch und den einzelnen Parametervariationen für die Situation „Parkplatz“

Tab. 11: Signifikante Unterschiede zwischen Gruppe 1 und Gruppe 2 für die Detektion der US-Geräusche für die Situation „Parkplatz“ über alle drei Parklücken gemittelt.

Tab. 12: Paarweise Vergleiche der Ortungsfehler zwischen UN-Geräuschen ohne Stationär-Geräusch und den UN-Geräuschen mit Stationär-Geräusch und den einzelnen Parametervariationen für die Situation „Parkplatz“

Tab. 13: Paarweise Vergleiche der Ortungsfehler zwischen US-Geräuschen ohne Stationär-Geräusch und den US-Geräuschen mit Stationär-Geräusch und den einzelnen Parametervariationen für die Situation „Parkplatz“

Tab. 14: Paarweise Vergleiche zwischen UN-Geräuschen ohne Stationär-Geräusch und den UN-Geräuschen mit Stationär-Geräusch und den einzelnen Parametervariationen für die Situation „Kreuzung“

Tab. 15: Paarweise Vergleiche zwischen US-Geräuschen ohne Stationär-Geräusch und den US-Geräuschen mit Stationär-Geräusch und den einzelnen Parametervariationen für die Situation „Kreuzung“

Tab. 16: Paarweise Vergleiche der Ortungsfehler zwischen UN-Geräuschen ohne Stationär-Geräusch und den UN-Geräuschen mit Stationär-Geräusch und den einzelnen Parametervariationen für die Situation „Kreuzung“

Tabellen

Tab. 1: Präzisierung der zu untersuchenden Verkehrssituationen

Tab. 2: Definition der Geräusch-Begriffe

Tab. 3: Schematische Darstellung der Variationen der Stationär-Geräusche am Beispiel der Pegelstufe 1

Tab. 4: Paarweise Vergleiche zwischen UN-Geräuschen ohne Stationär-Geräusch und den UN-Geräuschen mit Stationär-Geräusch und den einzelnen Parametervariationen für die Situation „Anfahren“

Tab. 5: Paarweise Vergleiche zwischen US-Geräuschen ohne Stationär-Geräusch und den US-Geräuschen mit Stationär-Geräusch und den einzelnen Parametervariationen für die Situation „Anfahren“

Tab. 6: Paarweise Vergleiche zwischen UN-Geräuschen ohne Stationär-Geräusch und den UN-Geräuschen mit Stationär-Geräusch und den einzelnen Parametervariationen für die Situation „Anhalten“

Tab. 7: Paarweise Vergleiche zwischen US-Geräuschen ohne Stationär-Geräusch und den US-Geräuschen mit Stationär-Geräusch und den einzelnen Parametervariationen für die Situation „Anhalten“

-
- Tab. 17: Paarweise Vergleiche der Ortungsfehler zwischen US-Geräuschen ohne Stationär-Geräusch und den US-Geräuschen mit Stationär-Geräusch und den einzelnen Parametervariationen für die Situation „Kreuzung“
- Tab. 18: Paarweise Vergleiche der Ortungsfehler zwischen UN-Geräuschen ohne Stationär-Geräusch und den UN-Geräuschen mit Stationär-Geräusch und den einzelnen Parametervariationen für die Situation „Kreuzung“
- Tab. 19: Paarweise Vergleiche der Ortungsfehler zwischen UN-Geräuschen ohne Stationär-Geräusch und den UN-Geräuschen mit Stationär-Geräuschen und den einzelnen Parametervariationen für die Situation „Kreuzung“
- Tab. 20: Übersicht über die im Feldtest verifizierten Parameterkombinationen
- Tab. 21: Zuteilung der Unfalltypen zu den Unfallszenarien
- Tab. 22: Zuordnung Standgeräuschpegel
- Tab. 23: Übersicht Fallzahlen leisere Fahrzeuge

Anhang

1 Situation „Anhalten“

Quelle	Pegel	Frequenzsprung	Rauigkeit	Signifikanz
Pegel	Pegelstufe 1 vs. (Pegelsprung + Pegelstufe 2)			,001
Frequenzsprung		Frequenzsprung 0% vs. (Frequenzsprung 50% + 100%)		,000
		Frequenzsprung 50% vs. Frequenzsprung 100%		,000
Pegel * Frequenzsprung	Pegelsprung vs. Pegelstufe 2	Frequenzsprung 50% vs. Frequenzsprung 100%		,003
Pegel * Rauigkeit	Pegelsprung vs. Pegelstufe 2		Rauigkeit 20Hz vs. Rauigkeit 10Hz	,003
Frequenzsprung * Rauigkeit		Frequenzsprung 0% vs. (Frequenzsprung 50% + 100%)	Rauigkeit 30Hz vs. (Rauigkeit 20Hz + 10Hz)	,001
		Frequenzsprung 50% vs. Frequenzsprung 100%	Rauigkeit 20Hz vs. Rauigkeit 10Hz	,046
Pegel * Frequenzsprung * Rauigkeit	Pegelstufe 1 vs. (Pegelsprung + Pegelstufe 2)	Frequenzsprung 50% vs. Frequenzsprung 100%	Rauigkeit 20Hz vs. Rauigkeit 10Hz	,030

Tab. 24: Signifikanztest: Kontraste der Parameter der Stationär-Geräusche für die Situation „Anhalten“

2 Situation „Parkplatz“

2.1 Situation „Parkplatz“ – Reaktionszeiten

In den nachfolgenden Tabellen sind die signifikanten Unterschiede der Reaktionszeiten zwischen unterschiedlichen Gruppen dargestellt. Dabei sind die Mittleren Differenzen (MD) und die Signifikanz (p) angegeben. Ist die mittlere Differenz negativ bedeutet dies:

- dass die Gruppe 2 später detektiert als Gruppe 1,
- dass sehende Probanden später detektierten als blinde Probanden,
- dass männliche Probanden später detektieren als weibliche.

Parklücke	Pegelstufe	Frequenz- sprung (%)	Rauigkeitsänderung (Hz)	MD (s)	p	
Parklücke 1	Pegelstufe 1	50	30	-0,82	0,037	
			20	-0,98	0,038	
		0	20		-0,86	0,012
	Pegelsprung	50		30	-0,73	0,047
				20	-0,91	0,019
		100		20	-0,92	0,032
		0		10	-0,76	0,034
	Pegelstufe 2	50		20	-0,89	0,042
				10	-0,92	0,011
	100		30	-1,05	0,012	
			10	-0,86	0,020	
Parklücke 2		0	30	-1,03	0,005	
	Pegelstufe 1	50		10	-0,62	0,049
				30	-0,77	0,049
	Pegelsprung	50		30	-0,74	0,034
Pegelstufe 2	50		20	-0,97	0,033	
			30	-1,14	0,015	
Parklücke 3	Pegelstufe 1	50	20	-0,87	0,044	
			30	-1,03	0,019	
		100		20	-1,00	0,042
				10	-1,02	0,019
	Pegelsprung	0		20	-0,91	0,039
100				10	-0,99	0,031
Pegelstufe 2	50		10	-0,83	0,038	

Tab. 25: Signifikante Unterschiede zwischen Gruppe 1 und Gruppe 2 für die Detektion der UN-Geräusche für die Situation „Parkplatz“ über alle drei Parklücken getrennt

Parklücke	Pegelstufe	Frequenz- sprung (%)	Rauigkeitsänderung (Hz)	MD (s)	p
Parklücke 1	Pegelsprung	0	30	-0,81	0,030
		50	30	-0,69	0,045
		100	20	-0,87	0,025
	Pegelstufe 2	50	30	-0,68	0,045
		100	10	-0,90	0,032
Parklücke 2	Pegelstufe 1	0	20	-0,86	0,035
	Pegelsprung	0	20	-0,88	0,024
			30	-0,84	0,040
		0	10	-0,88	0,046
	Pegelstufe 2	100	20	-0,91	0,029
Parklücke 3	Pegelstufe 1	0	20	-0,90	0,040
			10	-1,12	0,007
	Pegelsprung	50	30	-1,15	0,047
			20	-1,12	0,017
	Pegelstufe 2	0	10	-1,59	0,012
			20	-1,05	0,033
		50	10	-0,96	0,039
			30	-1,00	0,030

Tab. 26: Signifikante Unterschiede zwischen Gruppe 1 und Gruppe 2 für die Detektion der US-Geräusche für die Situation „Parkplatz“ über alle drei Parklücken getrennt

2.2 Situation „Parkplatz“ – Ortung

Parklücke	Pegelstufe	Frequenzsprung (%)	Rauigkeitsänderung (Hz)	MD (Parklückenbreite)	p
Parklücke 1	Pegelsprung	0	20	0,55	0,038
		50	20	0,95	0,002
Parklücke 2	Pegelstufe 1	ohne AVAS_stat		0,70	0,001
Parklücke 3	Pegelsprung	0	10	-0,80	0,006

Tab. 27: Signifikante Unterschiede zwischen blinden und sehenden Probanden für die Ortung der UN-Geräusche für die Situation „Parkplatz“ über alle drei Parklücken getrennt

Parklücke	Pegelstufe	Frequenzsprung (%)	Rauigkeitsänderung (Hz)	MD (Parklückenbreite)	p
Parklücke 1	Pegelstufe 1	0	30	0,64	0,029
	Pegelstufe 2	ohne AVAS_stat		0,82	0,003
Parklücke 2	Pegelstufe 1	0	10	0,82	0,013

Tab. 28: Signifikante Unterschiede zwischen weiblichen und männlichen Probanden für die Ortung der UN-Geräusche für die Situation „Parkplatz“ über alle drei Parklücken getrennt

Parklücke	Pegelstufe	Frequenzsprung (%)	Rauigkeitsänderung (Hz)	MD (Parklückenbreite)	p
Parklücke 2	Pegelstufe 1	100	10	-0,59	0,024
	Pegelstufe 2	100	10	-0,62	0,003

Tab. 29: Signifikante Unterschiede zwischen Gruppe 1 und Gruppe 2 für die Ortung der US-Geräusche für die Situation „Parkplatz“ über alle drei Parklücken getrennt

Parklücke	Pegelstufe	Frequenzsprung (%)	Rauigkeitsänderung (Hz)	MD (Parklückenbreite)	p
Parklücke 1	Pegelstufe 1	0	30	0,65	0,043
	Pegelsprung	0	30	0,60	0,038
		0	10	0,70	0,018
	Pegelstufe 2	50	10	0,70	0,013
		100	30	0,70	0,002
Parklücke 2	Pegelstufe 2	ohne AVAS_stat		0,55	0,040
		100	30	0,55	0,042

Tab. 30: Signifikante Unterschiede zwischen blinden und sehenden Probanden für die Ortung der US-Geräusche für die Situation „Parkplatz“ über alle drei Parklücken getrennt

Parklücke	Pegelstufe	Frequenzsprung (%)	Rauigkeitsänderung (Hz)	MD (Parklückenbreite)	p
Parklücke 1	Pegelstufe 1	50	20	0,73	0,015
		0	20	0,66	0,028
	Pegelstufe 2	50	10	0,72	0,011
		100	30	0,54	0,022
Parklücke 2	Pegelstufe 1	50	30	0,94	0,025
Parklücke 3	Pegelsprung	100	10	0,60	0,049

Tab. 31: Signifikante Unterschiede zwischen weiblichen und männlichen Probanden für die Ortung der US-Geräusche für die Situation „Parkplatz“ über alle drei Parklücken getrennt

3 Situation „Kreuzung“

3.1 Situation „Kreuzung“ – Reaktionszeiten

In den nachfolgenden Tabellen sind die signifikanten Unterschiede der Reaktionszeiten zwischen unterschiedlichen Gruppen dargestellt. Dabei sind die Mittleren Differenzen (MD) in Sekunden und die Signifikanz (p) angegeben. Ist die mittlere Differenz negativ bedeutet dies:

- dass die Gruppe 2 später detektiert als Gruppe 1,
- dass sehende Probanden später detektierten als blinde Probanden,
- dass männliche Probanden später detektieren als weibliche.

Uhrzeit	Pegelstufe	Frequenz- sprung (%)	Rauigkeitsänderung (Hz)	Fahrt- richtung	MD (s)	p	
1 Uhr	Pegelstufe 1	0	30	X	-0,41	0,023	
				Y	-0,70	0,009	
		50	20	X	-0,61	0,008	
		100	10	Y	-0,65	0,016	
	Pegelsprung	ohne AVAS_stat			Y	-0,59	0,024
		50	10	Y	-0,68	0,006	
	Pegelstufe 2	ohne AVAS_stat			Y	-0,59	0,024
		50	20	X	-0,55	0,041	
		100	30	X	-0,48	0,018	
			20	X	-0,65	0,030	
	3 Uhr	Pegelstufe 1	100	20	Y	-0,45	0,043
		Pegelstufe 2	0	30	X	-0,20	0,037
100			20	X	-0,29	0,041	
			10	X	-0,45	0,032	
5 Uhr	Pegelstufe 1	0	20	X	-0,46	0,040	
		100	30	X	-0,39	0,025	
8 Uhr	Pegelstufe 1	100	10	X	-0,61	0,025	
	Pegelstufe 2	50	20	Y	-0,43	0,049	
		100	20	Y	-0,53	0,024	
10 Uhr	Pegelstufe 1	0	20	Y	-0,65	0,008	
	Pegelsprung	100	20	Y	-0,45	0,046	
	Pegelstufe 2	0	10	X	-0,65	0,045	
		100	20	Y	-0,49	0,009	
12 Uhr	Pegelstufe 1	100	30	X	-0,62	0,039	
	Pegelstufe 2	0	20	Y	-0,74	0,025	
		50	20	Y	-0,32	0,020	

Tab. 32: Signifikante Unterschiede zwischen Gruppe 1 und Gruppe 2 für die Detektion der UN-Geräusche für die Situation „Kreuzung“ für alle Uhrzeiten getrennt

Uhrzeit	Pegelstufe	Frequenz- sprung (%)	Rauigkeitsänderung (Hz)	Fahrt- richtung	MD (s)	p
3 Uhr	Pegelsprung	100	20	Y	0,56	0,030
5 Uhr	Pegelstufe 2	100	30	X	0,45	0,050
			10	Y	0,49	0,039
8 Uhr	Pegelstufe 2	50	30	X	0,58	0,037
10 Uhr	Pegelstufe 1	50	20	X	0,86	0,011
	Pegelsprung	100	30	X	0,48	0,036
			10	X	0,49	0,038
12 Uhr	Pegelstufe 2	100	20	X	0,62	0,026

Tab. 33: Signifikante Unterschiede zwischen blinden/sehbeeinträchtigten Probanden und sehenden Probanden für die Detektion der UN-Geräusche für die Situation „Kreuzung“ für alle Uhrzeiten getrennt

Uhrzeit	Pegelstufe	Frequenz- sprung (%)	Rauigkeitsänderung (Hz)	Fahrt- richtung	MD (s)	p
1 Uhr	Pegelstufe 1	50	20	Y	-0,66	0,014
	Pegelstufe 2	50	20	X	-0,55	0,043
			10	Y	-0,47	0,050
3 Uhr	Pegelstufe 2	0	20	X	-0,52	0,003
		50	30	X	-0,51	0,028
10 Uhr	Pegelstufe 1	50	20	X	-0,74	0,044
	Pegelstufe 2	100	20	X	-0,72	0,032
12 Uhr	Pegelstufe 1	50	30	X	-0,67	0,038
	Pegelstufe 3	0	30	X	-0,61	0,033

Tab. 34: Signifikante Unterschiede zwischen weiblichen und männlichen Probanden für die Detektion der UN-Geräusche für die Situation „Kreuzung“ für alle Uhrzeiten getrennt

Uhrzeit	Pegelstufe	Frequenzsprung (%)	Rauigkeitsänderung (Hz)	Fahrt-richtung	MD (s)	p
1 Uhr	Pegelstufe 1	0	10	X	-0,54	0,040
				Y	-0,79	0,029
		50	10	X	-0,51	0,009
	Pegelsprung	ohne AVAS_stat		X	-0,63	0,003
		0	20	X	-0,34	0,016
		50	20	Y	-0,44	0,048
	Pegelstufe 2	ohne AVAS_stat		X	-0,63	0,003
		0	10	Y	-0,42	0,046
		50	30	X	-0,43	0,034
			20	X	-0,41	0,020
100		30	X	-0,40	0,043	
3 Uhr	Pegelstufe 1	ohne AVAS_stat		X	-0,55	0,013
		0	10	X	-0,60	0,031
	Pegelstufe 2	50	10	X	-0,54	0,019
5 Uhr	Pegelstufe 2	50	20	Y	-0,53	0,018
		100	30	Y	-0,55	0,043
8 Uhr	Pegelstufe 1	0	30	Y	-0,48	0,023
	Pegelsprung	0	20	Y	-0,62	0,034
	Pegelstufe 2	0	10	Y	-0,39	0,035
10 Uhr	Pegelstufe 1	100	30	X	-0,79	0,013
		ohne AVAS_stat		Y	-0,59	0,030
	Pegelsprung	50	10	X	-0,67	0,002
		100	20	Y	-0,54	0,049
			10	X	-0,50	0,039
	Pegelstufe 2	ohne AVAS_stat		Y	-0,59	0,030
		0	20	X	-0,67	0,011
			30	X	-0,76	0,016
		100	30	Y	-0,61	0,047
			20	X	-0,62	0,015
10	X	-0,52	0,031			
12 Uhr	Pegelsprung	50	20	X	-0,71	0,007
	Pegelstufe 2	100	20	Y	-0,79	0,012

Tab. 35: Signifikante Unterschiede zwischen Gruppe 1 und Gruppe 2 für die Detektion der US-Geräusche für die Situation „Kreuzung“ für alle Uhrzeiten getrennt

Uhrzeit	Pegelstufe	Frequenzsprung (%)	Rauigkeitsänderung (Hz)	Fahrt-richtung	MD (s)	p
10 Uhr	Pegelsprung	100	10	X	0,45	0,048
	Pegelstufe 2	100	20	Y	0,49	0,050
12 Uhr	Pegelsprung	100	30	Y	0,64	0,038
			20	Y	0,81	0,018
	Pegelstufe 2	50	10	Y	0,73	0,037
		100	30	Y	0,60	0,032

Tab. 36: Signifikante Unterschiede zwischen blinden/sehbeeinträchtigten Probanden und sehenden Probanden für die Detektion der US-Geräusche für die Situation „Kreuzung“ für alle Uhrzeiten getrennt

Uhrzeit	Pegelstufe	Frequenzsprung (%)	Rauigkeitsänderung (Hz)	Fahrt-richtung	MD (s)	p
1 Uhr	Pegelstufe 1	0	20	X	-0,59	0,033
	Pegelsprung	50	20	Y	-0,47	0,026
3 Uhr	Pegelstufe 2	0	30	Y	-0,33	0,032
8 Uhr	Pegelstufe 2	0	30	Y	-0,60	0,022
10 Uhr	Pegelstufe 2	0	20	Y	-0,58	0,007
12 Uhr	Pegelstufe 1	50	20	Y	-0,68	0,033
			10	Y	-0,79	0,026
	100	30	X	-0,80	0,014	
		10	X	-1,02	<0,0005	

Tab. 37: Signifikante Unterschiede zwischen weiblichen und männlichen Probanden für die Detektion der US-Geräusche für die Situation „Kreuzung“ für alle Uhrzeiten getrennt

3.2 Situation „Kreuzung“ – Ortung

Werden die Ergebnisse der unterschiedlichen Stationär-Geräusch-Parameter miteinander verglichen, zeigen sich in den Ortungsfehlern der UN-Geräusche folgende signifikante Unterschiede:

- Zwischen den Uhrzeiten ($p < 0,0005$):
 - Geräusche aus 1 Uhr weisen einen signifikant kleineren Ortungsfehler auf als Geräusche aus 5 Uhr ($p < 0,0005$), 8 Uhr ($p = 0,021$), 10 Uhr ($p = 0,036$) und 12 Uhr ($p = 0,005$),
 - Geräusche aus 3 Uhr weisen einen signifikant kleineren Ortungsfehler auf als Geräusche aus 5 Uhr ($p < 0,0005$), 8 Uhr ($p = 0,001$) 10 Uhr ($p = 0,004$) und 12 Uhr ($p = 0,011$),
 - Geräusche aus 8 Uhr weisen einen signifikant kleineren Ortungsfehler auf als Geräusche aus 5 Uhr ($p = 0,005$),
 - Geräusche aus 10 Uhr weisen einen signifikant kleineren Ortungsfehler auf als Geräusche aus 5 Uhr ($p = 0,002$),
 - Geräusche aus 12 Uhr weisen einen signifikant kleineren Ortungsfehler auf als Geräusche aus 5 Uhr ($p = 0,021$).
- Zwischen den Pegelstufen ($p < 0,0005$):
 - Geräusche mit Pegelsprung weisen einen signifikant kleineren Ortungsfehler auf als Geräusche mit Pegelstufe 1 ($p < 0,0005$),
 - Geräusche mit Pegelstufe 2 weisen einen signifikant kleineren Ortungsfehler aus als Geräusche mit Pegelstufe 1 ($p < 0,0005$) oder Pegelsprung ($p < 0,0005$).
- Interaktion Richtung und Uhrzeit ($p < 0,0005$),
- Interaktion Uhrzeit, Fahrtrichtung und Rauigkeitsänderung ($p = 0,006$),
- Interaktion Frequenzsprung und Rauigkeitsänderung ($p = 0,032$).

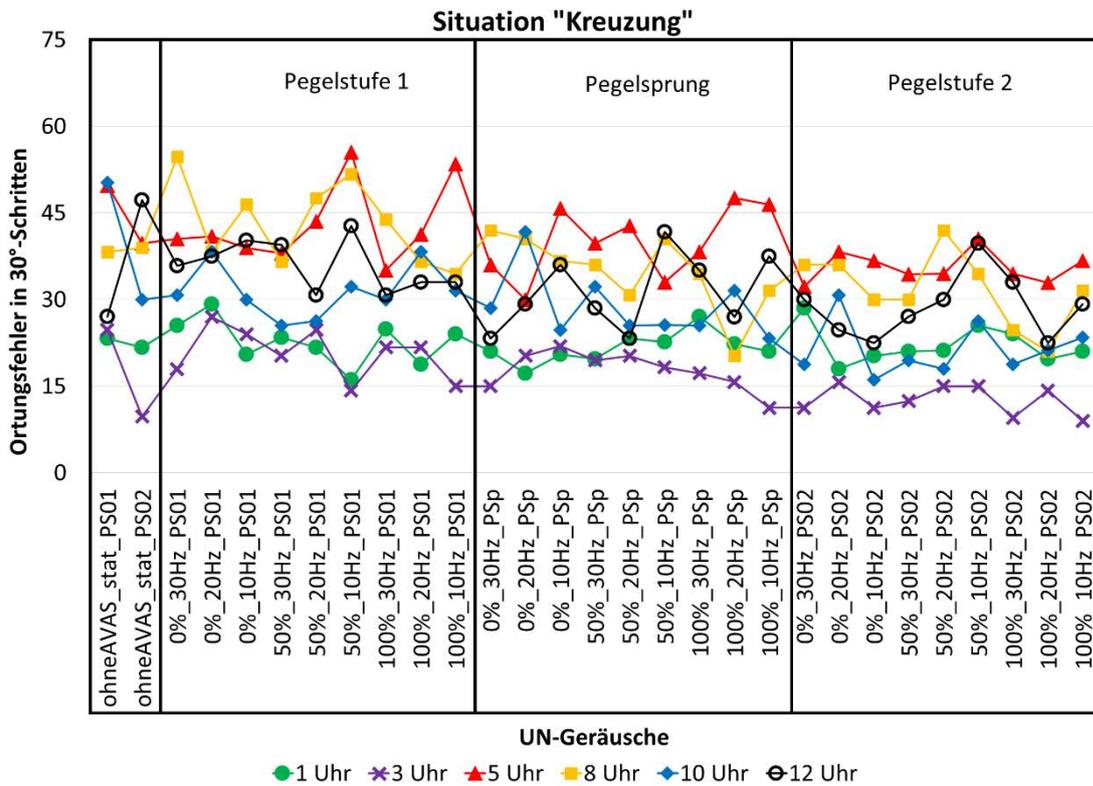


Bild 95: Darstellung der Ortungsfehler in 30°-Schritten für die Situation „Kreuzung“ für alle UN-Geräusche aus X-Richtung – getrennt für die Uhrzeiten

In den nachfolgenden Tabellen sind die signifikanten Unterschiede der Ortbarkeit zwischen unterschiedlichen Gruppen dargestellt. Dabei sind die Mittleren Differenzen (MD) in Grad und die Signifikanz (p) angegeben. Ist die mittlere Differenz negativ bedeutet dies:

- dass die Gruppe 2 größere Ortungsfehler aufweist als Gruppe 1,
- dass sehende Probanden größere Ortungsfehler aufweisen als blinde Probanden,
- dass männliche Probanden größere Ortungsfehler aufweisen als weibliche.

Uhrzeit	Pegelstufe	Frequenzsprung (%)	Rauigkeitsänderung (Hz)	Fahrt-richtung	MD (°)	p
1 Uhr	Pegelstufe 1	0	30	X	-17,59	0,036
3 Uhr	Pegelstufe 1	50	10	X	15,11	0,032
		100	10	X	-13,53	0,034
	Pegelsprung	0	30	X	13,53	0,034

Tab. 38: Signifikante Unterschiede zwischen Gruppe 1 und Gruppe 2 für die Ortung der UN-Geräusche für die Situation „Kreuzung“ für alle Uhrzeiten getrennt

			20	X	17,52	0,030
		50	30	Y	16,09	0,026
			10	Y	23,53	0,019
8 Uhr	Pegelstufe 1	50	10	X	-36,77	0,034
	Pegelsprung	100	10	X	17,89	0,050
10 Uhr	Pegelsprung	100	20	X	-33,23	0,005
12 Uhr	Pegelsprung	100	30	X	-36,86	0,045

Tab. 38: Fortsetzung

Uhrzeit	Pegelstufe	Frequenz- sprung (%)	Rauigkeitsänderung (Hz)	Fahrt- richtung	MD (°)	p	
1 Uhr	Pegelstufe 1	0	30	Y	19,14	0,027	
	Pegelsprung	0	30	Y	14,96	0,031	
			20	X	17,82	0,002	
	Pegelstufe 2	0	50	10	X	23,93	0,005
			20	Y	20,23	0,022	
			10	X	16,24	0,005	
50			Y	13,38	0,036		
3 Uhr	Pegelstufe 1	0	20	Y	28,12	0,003	
	Pegelsprung	100	30	Y	26,36	0,006	
	Pegelstufe 2	ohne AVAS_stat		X	9,55	0,030	
8 Uhr	Pegelstufe 1	0	30	X	-25,04	0,044	
	Pegelsprung	0	20	Y	-17,36	0,047	
10 Uhr	Pegelsprung	100	30	X	24,51	0,020	
		100	10	X	20,23	0,046	
	Pegelstufe 2	0	30	X	17,67	0,036	
12 Uhr	Pegelsprung	0	10	X	29,47	0,042	
		50	20	X	29,25	0,028	

Tab. 39: Signifikante Unterschiede zwischen blinden und sehenden Probanden für die Ortung der UN-Geräusche für die Situation „Kreuzung“ für alle Uhrzeiten getrennt

Uhrzeit	Pegelstufe	Frequenz- sprung (%)	Rauigkeitsänderung (Hz)	Fahrt- richtung	MD (°)	p
1 Uhr	Pegelstufe 1	ohne AVAS_stat		Y	23,94	0,013
		0	30	X	13,99	0,049
		50	10	X	18,84	0,004
	Pegelsprung	0	20	X	14,09	0,018
		50	30	X	24,20	0,012
	Pegelstufe 2	ohne AVAS_stat		X	21,06	0,019
		0	20	Y	21,36	0,016
		50	10	Y	16,59	0,046
		100	30	Y	16,67	0,029
	3 Uhr	Pegelstufe 1	ohne AVAS_stat		X	18,64
0			20	Y	19,09	0,050
Pegelstufe 2		50	30	Y	22,73	0,029
5 Uhr	Pegelstufe 2	50	10	X	29,39	0,017
8 Uhr	Pegelsprung	100	10	Y	34,70	0,010
12 Uhr	Pegelstufe 1	0	20	Y	-36,52	0,013
		0	10	Y	15,29	0,040
	Pegelsprung	50	20	X	36,06	0,027
		100	10	Y	36,36	0,026

Tab. 40: Signifikante Unterschiede zwischen männlichen und weiblichen Probanden für die Ortung der UN-Geräusche für die Situation „Kreuzung“ für alle Uhrzeiten getrennt

Werden die Ortungsfehler für die US-Geräusche über alle Winkel getrennt untersucht, ergeben sich folgende signifikante Unterschiede:

- Zwischen den Uhrzeiten ($p < 0,0005$):
 - Geräusche aus 1 Uhr weisen einen signifikant kleineren Ortungsfehler auf als Geräusche aus 5 Uhr ($p < 0,0005$), 8 Uhr ($p = 0,023$), 10 Uhr ($p = 0,005$) und 12 Uhr ($p = 0,002$),

-
- Geräusche aus 3 Uhr weisen einen signifikant kleineren Ortungsfehler auf als Geräusche aus 5 Uhr ($p < 0,0005$), 8 Uhr ($p = 0,005$), 10 Uhr ($p = 0,005$) und 12 Uhr ($p = 0,004$),
 - Geräusche aus 8 Uhr weisen einen signifikant kleineren Ortungsfehler auf als Geräusche aus 5 Uhr ($p = 0,003$),
 - Geräusche aus 10 Uhr weisen einen signifikant kleineren Ortungsfehler auf als Geräusche aus 5 Uhr ($p = 0,004$).
 - Zwischen den Pegelstufen ($p < 0,0005$):
 - Geräusche mit Pegelsprung weisen einen signifikant kleineren Ortungsfehler auf als Geräusche mit Pegelstufe 1 ($p < 0,0005$),
 - Geräusche mit Pegelstufe 2 weisen einen signifikant kleineren Ortungsfehler auf als Geräusche mit Pegelstufe 1 und Pegelsprung ($p < 0,0005$).
 - Interaktion Uhrzeit und Fahrtrichtung ($p < 0,0005$),
 - Interaktion Uhrzeit, Fahrtrichtung und Frequenzsprünge ($p = 0,047$),
 - Interaktion Uhrzeit und Rauigkeitsänderung ($p = 0,008$),
 - Interaktion Pegel und Rauigkeitsänderung ($p = 0,034$).

Im Mittel zeigen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Rauigkeitsänderungen, aber im paarweisen Vergleich zeigt sich, dass Geräusche mit Rauigkeitsänderung 20 Hz signifikant kleinere Ortungsfehler aufweisen als Geräusche mit Rauigkeitsänderung 10 Hz ($p = 0,036$).

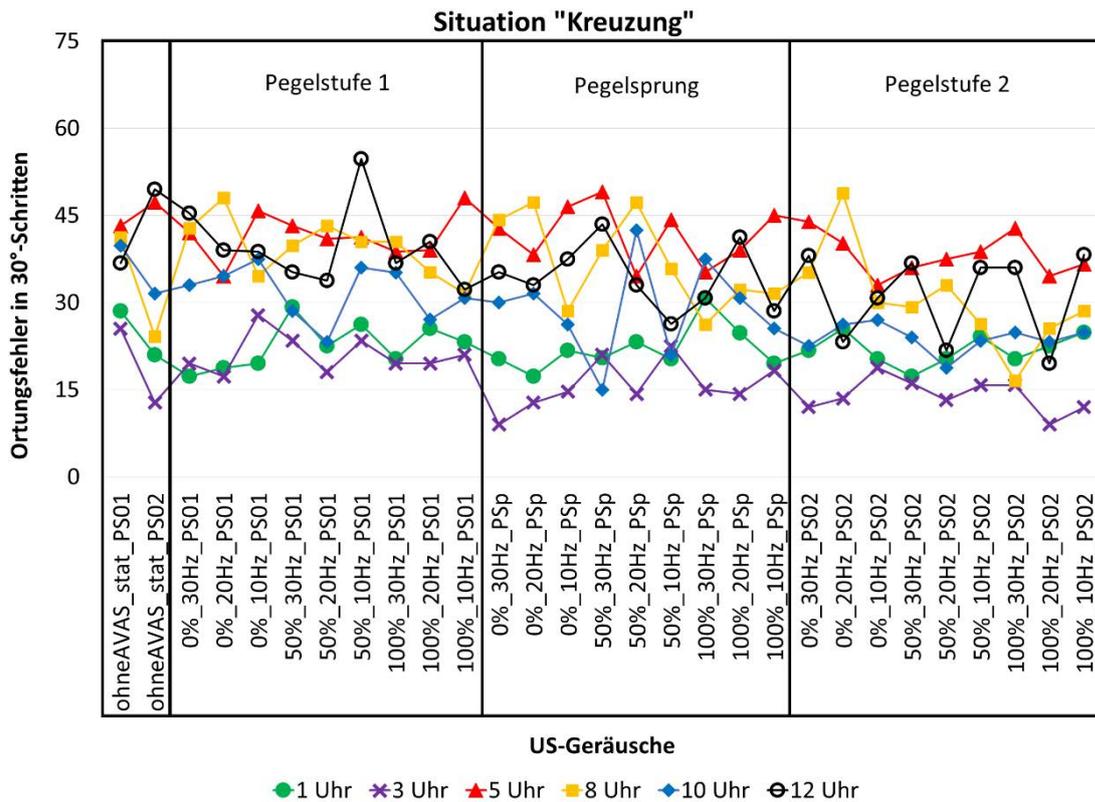


Bild 96: Darstellung der Ortungsfehler in 20°-Schritten für die Situation „Kreuzung“ für alle US-Geräusche aus X-Richtung – getrennt für die Uhrzeiten

Uhrzeit	Pegelstufe	Frequenzsprung (%)	Rauigkeitsänderung (Hz)	Fahrt-richtung	MD (°)	p
1 Uhr	Pegelsprung	100	20	Y	-15,26	0,047
	Pegelstufe 2	0	10	X	-18,72	0,018
3 Uhr	Pegelstufe 1	0	30	X	16,09	0,040
	Pegelsprung	100	20	Y	29,21	0,024
5 Uhr	Pegelstufe 1	50	20	X	-28,36	0,049
10 Uhr	Pegelstufe 2	100	10	X	-21,71	0,045
12 Uhr	Pegelsprung	50	30	Y	-26,47	0,030
		50	20	Y	-21,43	0,031

Tab. 41: Signifikante Unterschiede zwischen Gruppe 1 und Gruppe 2 für die Ortung der US-Geräusche für die Situation „Kreuzung“ für alle Uhrzeiten getrennt

Uhrzeit	Pegelstufe	Frequenz- sprung (%)	Rauigkeitsänderung (Hz)	Fahrt- richtung	MD (°)	p
1 Uhr	Pegelstufe 1	0	10	Y	29,57	0,015
	Pegelsprung	0	30	X	20,53	0,010
		0	10	X	20,53	0,013
	Pegelstufe 2	50	30	X	17,82	0,032
			20	Y	14,81	0,007
		10	X	17,86	0,017	
3 Uhr	Pegelstufe 1	50	20	Y	26,90	0,007
	Pegelsprung	0	20	X	12,26	0,015
	Pegelstufe 2	100	20	Y	15,11	0,006
8 Uhr	Pegelstufe 1	0	20	X	-28,87	0,025
	Pegelstufe 2	0	10	Y	15,79	0,017
10 Uhr	Pegelstufe 1	ohne AVAS_stat		Y	26,02	0,010
		50	20	X	26,24	0,001
			10	Y	23,76	0,037
	Pegelsprung	0	30	X	18,04	0,040
		100	20	X	24,51	0,034
	Pegelstufe 2	ohne AVAS_stat		X	20,90	0,018
		100	30	Y	19,64	0,025
			20	X	20,21	0,032
12 Uhr	Pegelstufe 1	50	30	X	37,07	0,025
		0	30	Y	28,14	0,036
	Pegelsprung	0	10	Y	28,00	0,040
		50	10	Y	39,17	0,035
		100	30	Y	26,54	0,028
	Pegelstufe 2	50	20	X	13,29	0,030
			10	Y	30,23	0,017

Tab. 42: Signifikante Unterschiede zwischen blinden und sehenden Probanden für die Ortung der US-Geräusche für die Situation „Kreuzung“ für alle Uhrzeiten getrennt

Uhrzeit	Pegelstufe	Frequenz- sprung (%)	Rauigkeitsänderung (Hz)	Fahrt- richtung	MD (°)	p	
	Pegelstufe 1	0	20	X	17,42	0,040	
		0	30	X	23,79	0,002	
	Pegelsprung	0	10	X	18,03	0,041	
		100	30	Y	21,67	0,004	
	Pegelstufe 2			30	X	26,21	0,005
			50	20	Y	11,06	0,050
			10	X	19,35	0,010	
		100	30	X	23,79	0,010	
			0	20	Y	26,97	0,004
			50	20	Y	28,72	0,016
3 Uhr	Pegelstufe 1	100	10	X	19,39	0,015	
		Pegelsprung	50	30	Y	27,73	0,015
		Pegelstufe 2	0	10	Y	18,99	0,047
	5 Uhr	Pegelstufe 1	50	10	X	31,06	0,024
			100	10	Y	29,85	0,027
8 Uhr	Pegelstufe 1	100	30	Y	12,58	0,049	
	Pegelstufe 2	100	20	Y	-15,72	0,041	
10 Uhr	Pegelstufe 2	ohne AVAS		Y	-18,79	0,013	
		0	20	Y	22,73	0,039	
12 Uhr	Pegelstufe 2	50	20	X	36,21	0,020	
		0	10	Y	26,97	0,046	

Tab. 43: Signifikante Unterschiede zwischen männlichen und weiblichen Probanden für die Ortung der US-Geräusche für die Situation „Kreuzung“ für alle Uhrzeiten getrennt

4 Lästigkeit

Paarweise Vergleiche UN-Geräusche (Stationär-Geräusch mit Fahrgeräusch)

(I) Stationär- geräusch		Mittlere Differenz (I-J)	Standard- fehler	Sig. ^b	95%-Konfidenz- intervall für die Differenz ^b	
					Unter- grenze	Ober- grenze
1 (ohne Stationär-Geräusch)	2	-1,902	3,343	,572	-8,659	4,854
	3	-2,252	3,799	,557	-9,931	5,427
	4	-2,000	3,787	,600	-9,655	5,655
	5	-4,016	3,334	,235	-10,754	2,721
	6	-,244	3,251	,941	-6,815	6,328
	7	-1,016	3,816	,791	-8,730	6,697
	8	-4,553	3,800	,238	-12,233	3,127
	9	-1,228	3,668	,740	-8,642	6,186
	10	-1,878	3,848	,628	-9,655	5,899
	2	1	1,902	3,343	,572	-4,854
3		-,350	1,463	,812	-3,306	2,606
4		-,098	2,190	,965	-4,523	4,328
5		-2,114	1,383	,134	-4,910	,682
6		1,659	1,440	,256	-1,252	4,569
7		,886	1,736	,613	-2,623	4,395
8		-2,650	1,673	,121	-6,031	,730
9		,675	1,866	,720	-3,097	4,447
10		,024	2,038	,991	-4,094	4,143
3		1	2,252	3,799	,557	-5,427
	2	,350	1,463	,812	-2,606	3,306
	4	,252	1,854	,893	-3,494	3,998
	5	-1,764	1,525	,254	-4,846	1,317
	6	2,008	1,479	,182	-,981	4,998
	7	1,236	1,536	,426	-1,869	4,340
	8	-2,301	1,431	,116	-5,193	,591
	9	1,024	1,626	,532	-2,263	4,311
	10	,374	1,913	,846	-3,492	4,240
	4	1	2,000	3,787	,600	-5,655
2		,098	2,190	,965	-4,328	4,523
3		-,252	1,854	,893	-3,998	3,494
5		-2,016	2,411	,408	-6,890	2,857
6		1,756	1,907	,363	-2,097	5,609
7		,984	1,518	,521	-2,084	4,051
8		-2,553	1,997	,209	-6,590	1,484
9		,772	2,101	,715	-3,475	5,020
10		,122	2,348	,959	-4,624	4,867
(II) Stationär- geräusch		1	4,016	3,334	,235	-2,721
	2	2,114	1,383	,134	-,682	4,910
	3	1,764	1,525	,254	-1,317	4,846
	4	2,016	2,411	,408	-2,857	6,890
	5	3,772*	1,687	,031	,363	7,182
	6	3,000	2,106	,162	-1,257	7,257
	7	-,537	1,538	,729	-3,645	2,572
	8	2,789	1,492	,069	-,226	5,804
	9	2,138	1,742	,227	-1,383	5,659
	5	1	,244	3,251	,941	-6,328
2		-1,659	1,440	,256	-4,569	1,252
3		-2,008	1,479	,182	-4,998	,981
4		-1,756	1,907	,363	-5,609	2,097
5		-3,772*	1,687	,031	-7,182	-,363
6		-,772	1,472	,603	-3,748	2,203
7		-4,309*	1,632	,012	-7,607	-1,011
8		-,984	1,532	,524	-4,080	2,113
9		-1,634	1,809	,372	-5,290	2,022
6		1	1,016	3,816	,791	-6,697
	2	-,886	1,736	,613	-4,395	2,623
	3	-1,236	1,536	,426	-4,340	1,869
	4	-,984	1,518	,521	-4,051	2,084
	5	-3,000	2,106	,162	-7,257	1,257
	6	,772	1,472	,603	-2,203	3,748
	7	-3,537*	1,722	,047	-7,016	-,057
	8	-,211	1,720	,903	-3,688	3,265
	9	-,862	1,716	,618	-4,331	2,607
	7	1	4,553	3,800	,238	-3,127
2		2,650	1,673	,121	-,730	6,031
3		2,301	1,431	,116	-,591	5,193
4		2,553	1,997	,209	-1,484	6,590
5		,537	1,538	,729	-2,572	3,645
6		4,309*	1,632	,012	1,011	7,607
7		3,537*	1,722	,047	,057	7,016
8		3,325*	1,243	,011	,814	5,837
9		2,675	1,772	,139	-,906	6,255
10		2,675	1,772	,139	-,906	6,255

* Die mittlere Differenz ist auf dem ,05-Niveau signifikant.

Paarweise Vergleiche UN-Geräusche (Stationär-Geräusch mit Fahrgeräusch)

(I) Stationär- geräusch	Mittlere Differenz (I-J)	Standard- fehler	Sig. ^b	95%-Konfidenz- intervall für die Differenz ^b		
				Unter- grenze	Ober- grenze	
9	1	1,228	3,668	,740	-6,186	8,642
	2	-,675	1,866	,720	-4,447	3,097
	3	-1,024	1,626	,532	-4,311	2,263
	4	-,772	2,101	,715	-5,020	3,475
	5	-2,789	1,492	,069	-5,804	,226
	6	,984	1,532	,524	-2,113	4,080
	7	,211	1,720	,903	-3,265	3,688
	8	-3,325*	1,243	,011	-5,837	-,814
	10	-,650	1,732	,709	-4,151	2,851
	10	1	1,878	3,848	,628	-5,899
2		-,024	2,038	,991	-4,143	4,094
3		-,374	1,913	,846	-4,240	3,492
4		-,122	2,348	,959	-4,867	4,624
5		-2,138	1,742	,227	-5,659	1,383
6		1,634	1,809	,372	-2,022	5,290
7		,862	1,716	,618	-2,607	4,331
8		-2,675	1,772	,139	-6,255	,906
9		,650	1,732	,709	-2,851	4,151

* Die mittlere Differenz ist auf dem ,05-Niveau signifikant.

Paarweise Vergleiche UN-Geräusche

(I) Stationär- geräusch		Mittlere Differenz (I-J)	Standard- fehler	Sig. ^b	95%-Konfidenz- intervall für die Differenz ^b	
					Unter- grenze	Ober- grenze
1	2	-7,496	3,731	,051	-15,036	,045
	3	-7,805*	3,586	,035	-15,052	-,557
	4	-10,098*	3,828	,012	-17,834	-2,361
	5	-9,008*	4,013	,030	-17,118	-,898
	6	-9,569*	3,827	,017	-17,304	-1,834
	7	-8,341*	3,757	,032	-15,935	-,748
	8	-8,309	4,306	,061	-17,011	,393
	9	-7,431	4,196	,084	-15,911	1,049
	10	-10,163*	4,264	,022	-18,781	-1,544
	2	1	7,496	3,731	,051	-,045
3		-,309	1,662	,853	-3,668	3,050
4		-2,602	1,538	,098	-5,710	,507
5		-1,512	1,651	,365	-4,849	1,825
6		-2,073	1,566	,193	-5,238	1,092
7		-,846	1,454	,564	-3,784	2,093
8		-,813	1,565	,606	-3,975	2,349
9		,065	1,566	,967	-3,099	3,229
10		-2,667	1,899	,168	-6,505	1,172
3		1	7,805*	3,586	,035	,557
	2	,309	1,662	,853	-3,050	3,668
	4	-2,293	1,692	,183	-5,713	1,128
	5	-1,203	1,917	,534	-5,078	2,672
	6	-1,764	1,568	,267	-4,933	1,404
	7	-,537	1,751	,761	-4,075	3,002
	8	-,504	1,988	,801	-4,522	3,514
	9	,374	1,749	,832	-3,161	3,909
	10	-2,358	2,284	,308	-6,974	2,259
	4	1	10,098*	3,828	,012	2,361
2		2,602	1,538	,098	-,507	5,710
3		2,293	1,692	,183	-1,128	5,713
5		1,089	1,661	,516	-2,268	4,447
6		,528	1,867	,779	-3,245	4,302
7		1,756	1,706	,310	-1,692	5,205
8		1,789	1,660	,288	-1,567	5,144
9		2,667	1,473	,078	-,310	5,643
10		-,065	2,191	,976	-4,493	4,363

(I) Stationär- geräusch		Mittlere Differenz (I-J)	Standard- fehler	Sig. ^b	95%-Konfidenz- intervall für die Differenz ^b	
					Unter- grenze	Ober- grenze
5	1	9,008*	4,013	,030	-,898	17,118
	2	1,512	1,651	,365	-1,825	4,849
	3	1,203	1,917	,534	-2,672	5,078
	4	-1,089	1,661	,516	-4,447	2,268
	6	-,561	1,550	,719	-3,694	2,572
	7	,667	1,255	,598	-1,870	3,204
	8	,699	1,625	,669	-2,585	3,984
	9	1,577	1,261	,218	-,971	4,125
	10	-1,154	1,442	,428	-4,069	1,760
	6	1	9,569*	3,827	,017	1,834
2		2,073	1,566	,193	-1,092	5,238
3		1,764	1,568	,267	-1,404	4,933
4		-,528	1,867	,779	-4,302	3,245
5		,561	1,550	,719	-2,572	3,694
7		1,228	1,664	,465	-2,135	4,590
8		1,260	1,772	,481	-2,322	4,842
9		2,138	1,813	,245	-1,527	5,803
10		-,593	1,820	,746	-4,273	3,086
7		1	8,341*	3,757	,032	,748
	2	,846	1,454	,564	-2,093	3,784
	3	,537	1,751	,761	-3,002	4,075
	4	-1,756	1,706	,310	-5,205	1,692
	5	-,667	1,255	,598	-3,204	1,870
	6	-1,228	1,664	,465	-4,590	2,135
	8	,033	1,902	,986	-3,812	3,877
	9	,911	1,607	,574	-2,338	4,159
	10	-1,821	1,700	,290	-5,257	1,615
	8	1	8,309	4,306	,061	-,393
2		,813	1,565	,606	-2,349	3,975
3		,504	1,988	,801	-3,514	4,522
4		-1,789	1,660	,288	-5,144	1,567
5		-,699	1,625	,669	-3,984	2,585
6		-1,260	1,772	,481	-4,842	2,322
7		-,033	1,902	,986	-3,877	3,812
9		,878	1,547	,573	-2,248	4,004
10		-1,854	1,743	,294	-5,376	1,668

* Die mittlere Differenz ist auf dem ,05-Niveau signifikant.

Paarweise Vergleiche UN-Geräusche

(I) Stationär- geräusch	Mittlere Differenz (I-J)	Standard- fehler	Sig. ^b	95%-Konfidenz- intervall für die Differenz ^b		
				Unter- grenze	Ober- grenze	
9	1	7,431	4,196	,084	-1,049	15,911
	2	-,065	1,566	,967	-3,229	3,099
	3	-,374	1,749	,832	-3,909	3,161
	4	-2,667	1,473	,078	-5,643	,310
	5	-1,577	1,261	,218	-4,125	,971
	6	-2,138	1,813	,245	-5,803	1,527
	7	-,911	1,607	,574	-4,159	2,338
	8	-,878	1,547	,573	-4,004	2,248
	10	-2,732	1,791	,135	-6,351	,888
10	1	10,163*	4,264	,022	1,544	18,781
	2	2,667	1,899	,168	-1,172	6,505
	3	2,358	2,284	,308	-2,259	6,974
	4	,065	2,191	,976	-4,363	4,493
	5	1,154	1,442	,428	-1,760	4,069
	6	,593	1,820	,746	-3,086	4,273
	7	1,821	1,700	,290	-1,615	5,257
	8	1,854	1,743	,294	-1,668	5,376
	9	2,732	1,791	,135	-,888	6,351

* Die mittlere Differenz ist auf dem ,05-Niveau signifikant.

5 Abbreviated Injury Scale

Die Abbreviated Injury Scale (AIS) ist eine Bewertungsskala für die Letalität von Einzelverletzungen. Sie wird in der Unfallforschung als Überlebenswahrscheinlichkeit mit einer erlittenen Einzelverletzung in Prozent angegeben (siehe Tabelle). So werden unterschiedliche Verletzungen in unterschiedlichen Verletzungsregionen vergleichbar.

Der Maximal Abbreviated Injury Scale (MAIS) wird für eine Person angegeben und entspricht dem höchsten AIS-Wert einer Einzelverletzung, unabhängig von der Anzahl der Einzelverletzungen (siehe Tabelle).

AIS	AIS-Verletzungsschwere	Überlebenswahrscheinlichkeit nach GIDAS (Stand: Juli 2014)
0	Unverletzt	100,0%
1	Gering	100,0%
2	Ernsthaft	99,8%
3	Schwer	96,5%
4	Sehr Schwer	82,0%
5	Kritisch	37,6%
6	Maximal (nicht behandelbar)	0,0%

Wahrscheinlichkeiten ermittelt durch MAIS und amtlicher Verletzungsschwere – Stand Juli 2014

AIS	Schweregrad	Verletzungen (Beispiele)	Letalitätsrate [%]
0	Unverletzt	keine	0,00
1	Gering	Schürfung, Schnittwunden, Stauchung, Prellung, Verbrennungen ersten und zweiten Grades bis zehn Prozent der Körperoberfläche	0,00
2	Ernsthaft	Großflächige Schürfung und Prellung, ausgedehnte Weichteilverletzungen, leichte Gehirnerschütterung mit Amnesie, Verbrennungen zweiten Grades bis 15 % Körperoberfläche, unkomplizierte Frakturen	0,07
3	Schwer	Schädelfraktur ohne Liquoraustritt, Gehirnerschütterung mit Bewusstlosigkeit, Pneumothorax, Verbrennungen zweiten Grades bis 25 % der Körperoberfläche, offene Frakturen	2,91
4	Sehr Schwer	Schädelfraktur mit Liquoraustritt, Gehirnerschütterung mit Bewusstlosigkeit bis 24 Stunden, Perforation des Thorax, Verbrennungen zweiten oder dritten Grades bis 35 % der Körperoberfläche	6,88
5	Kritisch	Schädelfraktur mit Hirnstammlutung, Organanriss oder -abriss, Verbrennungen dritten Grades bis 90 % der Körperoberfläche	32,32
6	Maximal (nicht behandelbar)	massive Kopfquetschung, Hirnstammlazeration, Schädelbasisfraktur, Thoraxquetschung, Aortaruptur, Trennung zwischen Thorax und Becken	100,0

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Fahrzeugtechnik“

2013

F 86: Experimentelle Untersuchung zur Unterstützung der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen für ältere Kraftfahrer

Hoffmann, Wipking, Blanke, Falkenstein € 16,50

F 87: 5th International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 88: Comparative tests with laminated safety glass panes and polycarbonate panes

Gehring, Zander € 14,00

F 89: Erfassung der Fahrermüdigkeit

Platho, Pietrek, Kolrep € 16,50

F 90: Aktive Systeme der passiven Fahrzeugsicherheit

Nuß, Eckstein, Berger € 17,90

F 91: Standardisierungsprozess für offene Systeme der Straßenverkehrstelematik

Kroen € 17,00

F 92: Elektrofahrzeuge – Auswirkungen auf die periodisch technische Überwachung

Beyer, Blumenschein, Bönninger, Grohmann, Lehmann, Meißner, Paulan, Richter, Stiller, Calker € 17,00

2014

F 93: Entwicklung eines Verfahrens zur Erfassung der Fahrerbeanspruchung beim Motorradfahren

Buld, Will, Kaussner, Krüger € 17,50

F 94: Biokraftstoffe – Fahrzeugtechnische Voraussetzungen und Emissionen

Pellmann, Schmidt, Eckhardt, Wagner € 19,50

F 95: Taxonomie von Fehlhandlungen bei der Fahrzeugführung

Oehme, Kolrep, Person, Byl € 16,50

F 96: Auswirkungen alternativer Antriebskonzepte auf die Fahrdynamik von Pkw

Schönemann, Henze € 15,50

F 97: Matrix von Lösungsvarianten Intelligenter Verkehrssysteme (IVS) im Straßenverkehr Matrix of alternative implementation approaches of Intelligent Transport Systems (ITS) in road traffic

Lotz, Herb, Schindhelm, Vierkötter
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 98: Absicherungsstrategien für Fahrerassistenzsysteme mit Umfeldwahrnehmung

Weitzel, Winner, Peng, Geyer, Lotz Sefati € 16,50

F 99: Study on smoke production, development and toxicity in bus fires

Hofmann, Dülsen € 16,50

2015

F 100: Verhaltensbezogene Kennwerte zeitkritischer Fahrmanöver

Powelleit, Muhrer, Vollrath, Henze, Liesner, Pawellek € 17,50

F 101: Altersabhängige Anpassung von Menschmodellen für die passive Fahrzeugsicherheit

Wagner, Segura, Mühlbauer, Fuchs, Peldschus, Freßmann € 19,00

F 102: 6th International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 103: Technische Möglichkeiten für die Reduktion der CO2-Emissionen von Nutzfahrzeugen

Süßmann, Lienkamp
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 104: Abbiege-Assistenzsystem für Lkw – Grundlagen eines Testverfahrens

Schreck, Seiniger € 14,50

F 105: Abgasverhalten von in Betrieb befindlichen Fahrzeugen und emissionsrelevanten Bauteilen – Feldüberwachung

Schmidt, Georges € 14,50

F 105b: Examination of pollutants emitted by vehicles in operation and of emission relevant components – In-service conformity

Schmidt, Johannsen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 106: Untersuchung des Abgasverhaltens von in Betrieb befindlichen Fahrzeugen und emissionsrelevanten Bauteilen – Austauschkatalysatoren

Schmidt, Johannsen € 13,50

F 106b: Examination of pollutants emitted by vehicles in operation and of emission relevant components – Replacement catalytic converters

Schmidt, Johannsen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 107: Sicherheitsaspekte beim Laden von Elektrofahrzeugen

Vogt, Link, Ritzinger, Ablingyte, Reindl € 16,50

F 108: Interoperabilität zwischen öffentlichem Verkehrsmanagement und individuellen Navigationsdiensten – Maßnahmen zur Gewährleistung

von der Ruhren, Kirschfink, Ansorge, Reusswig, Riegelhuth, Karina-Wedrich, Schopf, Sparmann, Wöbbing, Kannenberg € 17,50

F 109: Ermittlung des Umfangs von Abweichungen bei Durchführung der Abgasuntersuchung zwischen Messung am Auspuff und Abfrage des On-Board-Diagnosesystems

Schröder, Steickert, Walther, Ranftl
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 110: Wahrnehmung und Bewertung von Fahrzeugaußengeräuschen durch Fußgänger in verschiedenen Verkehrssituationen und unterschiedlichen Betriebszuständen

Altinsoy, Landgraf, Rosenkranz, Lachmann, Hagen, Schulze, Schlag
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 111: Geräuschminderung von Dünnschichtbelägen

Schulze, Kluth, Ruhnau, Hübelt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2016

F 112: Ersatz von Außenspiegeln durch Kamera-Monitor-Systeme bei Pkw und Lkw
Schmidt, Hoffmann, Krautscheid, Bierbach,
Frey, Gail, Lotz-Keens € 17,50

F 112b: Final Report Camera-Monitor-Systems as a Replacement for Exterior Mirrors in Cars and Trucks
Schmidt, Hoffmann, Krautscheid, Bierbach, Frey, Gail, Lotz-Keens
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 113: Erweiterung der Software TREMOD um zukünftige Fahrzeugkonzepte, Antriebe und Kraftstoffe
Bergk, Heidt, Knörr, Keller € 15,50

F 114: Barrierefreiheit bei Fernlinienbussen
Oehme, Berberich, Maier, Böhm € 17,50

F 115: Statischer und dynamischer Fahrsimulator im Vergleich – Wahrnehmung von Abstand und Geschwindigkeit
Frey
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2017

F 116: Lang-Lkw – Auswirkung auf Fahrzeugsicherheit und Umwelt
Süßmann, Förg, Wenzelis
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 117: 7th International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“ – Reports on the ESAR-Conference 2016 at Hannover Medical School
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 118: Bedeutung kompensativer Fahrerstrategien im Kontext automatisierter Fahrfunktionen
Voß, Schwalm € 16,50

F 119: Fahrzeugtechnische Eigenschaften von Lang-Lkw
Förg, Süßmann, Wenzelis, Schmeiler
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 120: Emissionen von über 30 Jahre alten Fahrzeugen
Steven, Schulte, Hammer, Lessmann, Pomsel
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 121: Laufleistungsabhängige Veränderungen der CO2-Emissionen von neuen Pkw
Pellmann, Schmidt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2018

F 122: Revision der Emissionsmodellierung für leichte Nutzfahrzeuge – Bedarfsanalyse auf Basis einer Vorstudie
Auf der Maur, Strassburg, Knörr, Heidt, Wuethrich
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 123: Motorradhelme – Identifizierung ihres Verbesserungspotenzials unter Berücksichtigung des Motorradunfallgeschehens
Pollak, Schueler, Bourdet, Deck, Willinger € 19,50

F 124: Aufbau eines Qualitätsmanagementsystems für die Erfassung und Weiterverarbeitung von Daten für IVS-Dienste
Heinrich, Pollesch, Schober, Stamatakis, Grzebellus, Radike, Schneider, Stapelfeld, Huber
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 125: Untersuchung zu Elektrokleinstfahrzeugen
Bierbach, Adolph, Frey, Kollmus, Bartels,
Hoffmann, Halbach € 19,50

2019

F 126: Einfluss zunehmender Fahrzeugautomatisierung auf Fahrkompetenz und Fahrkompetenzerwerb
Weißgerber, Grattenthaler, Hoffmann € 15,50

F 127: Erhöhung der Verkehrssicherheit älterer Kraftfahrer durch Verbesserung ihrer visuellen Aufmerksamkeit mittels „Sehfeldassistent“
Kupschick, Bürglen, Jürgensohn € 16,50

F 128: Potenzieller gesellschaftlicher Nutzen durch zunehmende Fahrzeugautomatisierung
Rösener, Sauerbier, Zlocki, Eckstein, Hennecke, Kemper, Oeser
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 129: Anforderungen an die dynamische Leuchtweitenregelung zur Vermeidung der Blendung entgegenkommender Verkehrsteilnehmer
Kosmas, Kobbert, Khanh € 15,50

F 130: Infrastrukturbedarf automatisierten Fahrens – Grundlagenprojekt
Dierkes, Friedrich, Heinrich, Hoffmann, Maurer, Reschka, Schendzielorz, Ungureanu, Vogt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 131: Fahrerassistenz- und Fahrerinformationssysteme (FAS/FIS) – Personale Voraussetzungen ihres Erwerbs und Nutzung durch ältere Kraftfahrerinnen und -fahrer
Hargutt, Kenntner-Mabiala,
Kaussner, Neukum
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2020

F 132: Handbuch Barrierefreiheit im Fernbuslinienverkehr
Boenke, Grossmann, Nass, Schäfer € 17,50

F 133: Lkw-Notbremsassistenzsysteme
Seiniger, Heini, Bühne, Gail € 15,50

F 134: Stationär-Geräusch von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen
Altinsoy, Lachmann, Rosenkranz, Steinbach € 19,00

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel.+(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.