

Forschungsbericht Nr. 76

Risiko hohe Beschleunigung? Straßenquerungsverhalten von Fußgänger:innen in Interaktion mit E-Fahrzeugen (mit und ohne AVAS) im Vergleich zu Verbrennern

Daniel Oberfeld-Twistel
Marlene Wessels
Sophie Kröling

Forschungsbericht Nr. 76

Risiko hohe Beschleunigung? Straßenquerungsverhalten von Fußgänger:innen in Interaktion mit E-Fahrzeugen (mit und ohne AVAS) im Vergleich zu Verbrennern

Bearbeitet durch:

Psychologisches Institut
Abteilung Allgemeine Experimentelle Psychologie
Johannes Gutenberg-Universität Mainz

Prof. Dr. Daniel Oberfeld-Twistel
Marlene Wessels



JOHANNES GUTENBERG
UNIVERSITÄT MAINZ

Projektleitung bei der UDV:

Sophie Kröling, M. Sc.

Impressum

Herausgeber

Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V.
Unfallforschung der Versicherer

Wilhelmstraße 43 / 43 G, 10117 Berlin
Postfach 08 02 64, 10002 Berlin
Tel. 030 / 20 20 – 50 00, Fax 030 / 20 20 – 60 00

E-Mail: unfallforschung@gdv.de
Internet: www.udv.de
Facebook: www.facebook.com/unfallforschung
Twitter: [@unfallforschung](https://twitter.com/unfallforschung)
YouTube: www.youtube.com/unfallforschung

Redaktion

Sophie Kröling, M. Sc.

Bildnachweise

UDV und siehe Quellenangaben

Erschienen

12/2021

ISBN-Nr.

978-3-948917-07-4

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	7
Abstract	10
1 Einleitung	13
2 Design und Implementierung des audiovisuellen Virtual-Reality Systems	16
2.1 Akustische Aufnahmen von Fahrten mit und ohne Beschleunigung	17
2.1.1 Teststrecke	17
2.1.2 Fahrzeuge	20
2.1.3 Audioaufnahmesystem	20
2.1.4 GPS-Positionstracking	21
2.2 Qualitätskontrolle und Auswahl der Stimuli	22
2.2.1 Begutachteter Zeitabschnitt der Aufnahmen	23
2.2.2 Qualitätskriterien für das gefahrene Geschwindigkeitsprofil	23
2.2.3 Qualitätskriterien für die Audiosignale	25
2.3 Laboraufbau	26
2.4 Auditive Simulation	28
2.5 Visuelle Simulation	30
2.6 Simulierte Verkehrsszenarien	30
3 Experiment 1: TTC-Schätzung im Prediction-Motion Paradigma	32
3.1 Methode	33
3.1.1 Versuchsbedingungen und Design	33
3.1.2 Trialablauf und Aufgabe	34
3.1.3 Erzeugung der TTC-Bedingungen	36
3.1.4 Vergleich der Geschwindigkeitsprofile zwischen den Fahrzeugtypen	37
3.1.5 Stichprobe	40
3.1.6 Versuchsablauf	41
3.2 Ergebnisse und Diskussion	41
3.2.1 TTC-Schätzungen bei den Konstantfahrten	41
3.2.2 TTC-Schätzungen bei den Beschleunigungsfahrten	46
3.2.3 Zusammenfassung der Ergebnisse von Experiment 1	57
4 Experiment 2: Entscheidungen in Straßenüberquerungssituationen („Street-Crossing“)	58
4.1 Methode	59

4.1.1	Versuchsbedingungen und Design	59
4.1.2	Straßenszene, Trialablauf und Aufgabe	60
4.1.3	Adaptive Prozedur und Datenauswertung	62
4.1.4	Stichprobe	64
4.1.5	Vorbereitung	64
4.1.6	Versuchsablauf	65
4.2	Ergebnisse und Diskussion	66
4.2.1	TTC _{50%} und Kollisionswahrscheinlichkeit bei den Konstantfahrten	66
4.2.2	TTC _{50%} und Kollisionswahrscheinlichkeit bei den Beschleunigungsfahrten	69
4.2.3	Zusammenfassung der Ergebnisse von Experiment 2	76
5	Experiment 3: Detektion von Beschleunigung	77
5.1	Methode	78
5.1.1	Aufgabe und Versuchsdesign	78
5.1.2	Stichprobe	80
5.2	Ergebnisse und Diskussion	80
5.3	Zusammenfassung der Ergebnisse von Experiment 3	85
6	Diskussion	87
6.1	Limitationen der Studie und Forschungsperspektiven	90
6.2	Praktische Implikationen	94
7	Literaturverzeichnis	96
8	Abkürzungsverzeichnis	102
9	Abbildungsverzeichnis	103
10	Tabellenverzeichnis	106
11	Anhang	108
11.1	Präsenzgefühl	108

Kurzfassung

Wenn Fußgänger:innen eine befahrene Straße sicher überqueren möchten, müssen sie die Ankunftszeit heranfahrender Fahrzeuge einschätzen. Eine sichere Überquerung vor einem heranfahrenden Fahrzeug erfordert, dass bei Beginn der Straßenüberquerung die verbleibende Zeit bis zur Ankunft des Fahrzeugs an der Position der Fußgänger:in (Kontaktzeit; time-to-contact, TTC) länger ist als die für das Überschreiten der Fahrbahn notwendige Zeit. Für eine sichere Straßenüberquerungsentscheidung ist also eine ausreichend präzise Einschätzung der TTC notwendig.

Für TTC-Schätzungen können neben visuellen auch auditive Informationen genutzt werden. Ziel dieses Projekts war die Beantwortung der Frage, ob in einer Straßenüberquerungssituation die im Vergleich zu Kraftfahrzeugen mit Verbrennungsmotor geänderte akustische Signatur von Elektrofahrzeugen zu potentiell riskanten TTC-Schätzungen und Straßenüberquerungsentscheidungen führen kann. Dabei standen Situationen im Fokus, in denen das sich nähernde Fahrzeug positiv beschleunigt, also seine Geschwindigkeit erhöht. Beschleunigungssituationen sind von besonderem Interesse, da E-Fahrzeuge auch bei hoher Beschleunigung weniger saliente Geräusche produzieren als Verbrenner. Die Hypothese war daher, dass Fußgänger:innen bei beschleunigenden E-Fahrzeugen die akustische Information weniger gut nutzen können und dies in Überschätzungen der TTC und riskanteren Überquerungsentscheidungen resultiert.

Für die Untersuchung der relevanten Verkehrssituationen wurde ein dem aktuellsten Stand der Technik entsprechendes audiovisuelles Virtual-Reality Simulationssystem aufgebaut. Mit diesem wurden erstmalig realistische und physikalisch plausible Simulationen von sich nähernden Verbrennern und E-Fahrzeugen bei konstanter Geschwindigkeit und unter Beschleunigung möglich. Um einen maximalen Realitätsgrad der in den Experimenten dargebotenen Fahrzeuggeräusche sicherzustellen, wurden in der akustischen Simulation als Quellsignale akustische Aufnahmen realer Fahrzeuge in den entsprechenden Fahrsituationen verwendet. Die drei im Projekt verglichenen Fahrzeugtypen waren ein Verbrenner, ein E-Fahrzeug ohne akustisches Fahrzeugwarnsystem (acoustic vehicle alerting system, AVAS) und ein E-Fahrzeug mit einem AVAS, das der derzeit in der EU gültigen UNECE Regelung Nr. 138 entsprach. Das AVAS war bis zu einer Geschwindigkeit von 28 km/h aktiv.

Die Studie umfasste drei Experimente, an der jeweils Versuchspersonen mit normalem Hörvermögen und normaler Sehfähigkeit teilnahmen. In Experiment 1 wurde die Perspektive einer Fußgänger:in simuliert, die am rechten Fahrbahnrand einer zweistreifigen Straße steht. Die Aufgabe war, die TTC eines sich auf dem rechten Fahrstreifen nähernden Fahrzeugs einzuschätzen. Für mit konstanter

Geschwindigkeit fahrende Fahrzeuge zeigte sich kein substantieller Effekt des Fahrzeugtyps auf die TTC-Schätzungen. Diese lagen für Verbrenner, E-Fahrzeug ohne AVAS und E-Fahrzeug mit AVAS relativ nah beieinander. Im Gegensatz dazu zeigte sich für die Beschleunigungsfahrten ein deutlicher und systematischer Effekt des Fahrzeugtyps auf die TTC-Schätzungen. Für die E-Fahrzeuge lagen die TTC-Schätzungen nahe an einer TTC-Schätzung erster Ordnung, die eine Nicht-Berücksichtigung der Beschleunigung repräsentiert und die in der Literatur auch konsistent für eine rein visuelle Darbietung berichtet wird. Mit zunehmender Beschleunigung und zunehmender tatsächlicher TTC wurde die Kontaktzeit für E-Fahrzeuge deutlich überschätzt. Die Versuchspersonen nahmen also die Zeit bis zum Eintreffen des E-Fahrzeugs an ihrer Position als länger wahr, als sie tatsächlich betrug. Diese TTC-Überschätzung könnte in einer realen Verkehrssituation zu riskanten Überquerungsentscheidungen führen. Im Gegensatz dazu war die Überschätzung der TTC bei Beschleunigung für die Verbrenner deutlich weniger ausgeprägt. Experiment 1 zeigt also zum ersten Mal, dass die durch ein Verbrennungsfahrzeug emittierte akustische Information die Kontaktzeitschätzungen für Beschleunigungsfahrten verbessert. Im Vergleich dazu konnten unsere Proband:innen die akustische Information der E-Fahrzeuge deutlich schlechter nutzen. Das bei niedrigen Geschwindigkeiten aktive AVAS verbesserte die TTC-Schätzungen für die beschleunigenden E-Fahrzeuge etwas, ohne jedoch das präzisere Niveau der Schätzungen für den Verbrenner zu erreichen.

In Experiment 2 wurde dasselbe Verkehrsszenario simuliert. Die Aufgabe war, zu einem bestimmten Zeitpunkt während der Heranfahrt eines Fahrzeugs zu entscheiden, ob in diesem Moment noch eine sichere Straßenüberquerung initiiert werden konnte oder nicht. Gemessen wurde für jede Versuchsbedingung diejenige TTC, bei der die Versuchsperson indifferent war, sich also in 50% der Durchgänge für und in den restlichen 50% der Durchgänge gegen eine Überquerungsinitiierung entschied. Wie erwartet, zeigten die Straßenüberquerungsentscheidungen in Experiment 2 überwiegend ein ähnliches Muster wie die TTC-Schätzungen in Experiment 1. Bei konstanter Geschwindigkeit waren die Unterschiede zwischen Verbrenner und den E-Fahrzeugen insgesamt eher gering. Bei höheren Geschwindigkeiten wurden zwar für das E-Auto ohne AVAS signifikant kürzere TTCs bei der Straßenüberquerung akzeptiert als für den Verbrenner, die Wahrscheinlichkeit einer riskanten (d.h., zur Kollision führenden) Überquerungsentscheidung war jedoch gegenüber dem Verbrenner nur leicht erhöht. Bei Beschleunigung zeigten sich – wie erwartet – für das E-Auto mit und ohne AVAS signifikant kürzere akzeptierte TTCs als für den Verbrenner. Dies ist kompatibel mit der in Experiment 1 gefundenen stärkeren Überschätzung der TTC für die E-Fahrzeuge bei Beschleunigung. Wenn die TTC des Fahrzeugs bei Initiieren einer Straßenüberquerung kürzer als die für die Überquerung notwendige Zeit ist, würde eine Kollision zwischen Fahrzeug und Fußgänger:in resultieren,

wenn das Fahrzeug nicht durch Bremsen reagiert. Die Wahrscheinlichkeit einer solchen riskanten Überquerungsentscheidung lag im Experiment in Interaktion mit dem E-Fahrzeug ohne AVAS mehr als 10% über der Kollisionswahrscheinlichkeit in Interaktion mit dem Verbrenner. Das AVAS reduzierte den Unterschied zwischen E-Fahrzeug und Verbrenner etwas, die Kollisionswahrscheinlichkeit lag aber auch für das E-Auto mit AVAS signifikant über dem Wert für den Verbrenner. In Experiment 3 wurde gemessen, wie gut der Zustand positiver Beschleunigung eines Fahrzeugs bei rein visueller Darbietung bzw. bei zusätzlicher Darbietung der Fahrzeuggeräusche (audiovisuell) detektiert werden kann. Hier zeigte sich, dass die Verfügbarkeit der Fahrzeuggeräusche die Genauigkeit der Beschleunigungserkennung stark verbessern. Dieser Detektionsvorteil in der audiovisuellen Bedingung war jedoch beim E-Fahrzeug ohne AVAS deutlich geringer als beim Verbrenner, während er für das E-Auto mit AVAS nahezu denselben Wert wie für den Verbrenner erreichte. Diese Daten bestätigen die Erwartung, dass die Fahrzeuggeräusche für die Erkennung eines Beschleunigungszustands von zentraler Bedeutung sind. Dieser Befund legt nahe, dass die in Experiment 1 beobachteten Überschätzungen der TTC und die in Experiment 2 gefundenen riskanteren Überquerungsentscheidungen für beschleunigende E-Fahrzeuge im Vergleich zu Verbrennern zum Teil darauf zurückgehen könnten, dass Fußgänger:innen Schwierigkeiten haben, zu erkennen, dass das sich nähernde E-Fahrzeug beschleunigt.

In der Zusammenschau zeigen die in diesem Projekt erhobenen Versuchsdaten zum ersten Mal, dass auditive Informationen (Fahrzeuggeräusche) nicht nur bei der akustischen Detektion von Fahrzeugen eine Rolle spielen (wenn das Fahrzeug sich außerhalb des Sichtfelds befindet). Vielmehr sind die Fahrzeuggeräusche für Fußgänger:innen auch dann relevant, wenn in Straßenüberquerungssituationen das Fahrzeug für sie vollständig sichtbar ist. Dabei konnten wir ebenfalls erstmalig zeigen, dass bei beschleunigten Heranfahrten die veränderte akustische Signatur von E-Fahrzeugen einen möglichen Risikofaktor für Fußgänger:innen in Straßenüberquerungssituationen darstellt. Der Aspekt von Straßenüberquerungsentscheidungen sollte in zukünftigen Studien und technischen Entwicklungen ebenso berücksichtigt werden wie der Aspekt der Detektion von Fahrzeugen, insbesondere auch bei der Gestaltung akustischer Warnsysteme. Auf dem hier untersuchten Gebiet ist weitere Forschung notwendig, etwa zum Vergleich einer größeren Bandbreite von AVAS-Varianten, zur Rolle auditiver Informationen für Straßenüberquerungsentscheidungen in Personengruppen mit eingeschränkten Seh- oder Hörfähigkeiten oder der Frage, ob und in welchem Ausmaß die Überquerungsentscheidungen von nicht motorisierten Verkehrsteilnehmer:innen in der Interaktion mit E-Fahrzeugen durch Erfahrung oder gezieltes Training verbessert werden können.

Abstract

If pedestrians want to cross a road while a vehicle is approaching, a safe crossing of the road is only possible if the time remaining until the vehicle arrives at the pedestrian's position (time-to-contact, TTC) is longer than the time needed to cross the road. Thus, a sufficiently accurate estimate of TTC is necessary for a safe road crossing decision.

The goal of this project was to answer the question of whether, in a road crossing situation, the altered acoustic signature of electric vehicles compared to vehicles with internal combustion engine (ICE) can lead to potentially risky TTC estimates and road crossing decisions. The focus was on situations in which the approaching vehicle accelerates positively, i.e., increases its speed. Acceleration situations are of particular interest because electric vehicles produce less salient noise than ICE vehicles, even under high acceleration. Our hypothesis was therefore that pedestrians are less able to use acoustic information when electric vehicles are accelerating, resulting in overestimations of TTC and riskier crossing decisions.

For the investigation of the relevant traffic situations, a state-of-the-art audiovisual virtual reality simulation system was designed, which for the first time provided realistic and physically plausible simulations of approaching ICE vehicles and electric vehicles at constant speed and under acceleration. To ensure a maximum degree of realism of the vehicle sounds presented in the experiments, acoustic recordings of real vehicles in the corresponding driving situations were used as source signals in the acoustic simulation. The vehicle types compared in the project were an ICE vehicle, an electric vehicle without an acoustic vehicle alerting system (AVAS), and an electric vehicle with an AVAS that complied with UNECE regulation No. 138 currently in force in the EU. The AVAS was active up to a speed of 28 km/h.

The study included three experiments, each involving subjects with normal hearing and normal vision. Experiment 1 simulated the perspective of a pedestrian standing on the right curb of a two-lane road. The task was to estimate the TTC of a vehicle approaching in the right lane. For vehicles traveling at constant speed, there was no substantial effect of vehicle type on the TTC estimates. These were relatively similar for the ICE vehicle, the electric vehicle without AVAS, and the electric vehicle with AVAS. In contrast, in the conditions with acceleration, there was a clear and systematic effect of vehicle type on the TTC estimates. For the electric vehicles, the TTC estimates were close to a first-order TTC estimate representing a failure to consider the acceleration, which is also consistently reported in the literature for visual-only presentations of accelerating objects. As the acceleration increased, the TTC for electric vehicles was significantly overestimated. Thus, subjects perceived the time of arrival of the electric vehicle at

their position as longer than it actually was. This TTC overestimation might lead to risky crossing decisions in a real traffic situation. In contrast, the overestimation of TTC under acceleration was much less pronounced for the ICE vehicle. Experiment 1 thus shows for the first time that acoustic information emitted by an ICE vehicle improves TTC estimates when the vehicle accelerates. In comparison, our subjects were significantly less able to use the acoustic information emitted by the electric vehicles. The AVAS somewhat improved TTC estimates for the accelerating electric vehicles, but without reaching the same level of accuracy as for the ICE vehicle.

In Experiment 2, the same traffic scenario was simulated. The task was to decide at a given moment during the approach of a vehicle whether or not a safe road crossing could still be initiated at that moment. For each experimental condition, the TTC was measured for which the participant was indifferent, i.e., decided in favor of a crossing initiation in 50% of the trials and against it in the remaining 50% of the trials. As expected, the road crossing decisions in Experiment 2 showed a pattern compatible with the TTC estimates in Experiment 1. At constant speeds, the differences between the crossing decisions for ICE and electric vehicles were rather small. Although significantly shorter TTCs were accepted for the electric car without AVAS than for the ICE vehicle at higher speeds, the probability of a risky crossing decision (i.e., leading to a collision) was increased by only a few percentage points compared to the ICE vehicle. Under acceleration, as expected, significantly shorter accepted TTCs were observed for the electric vehicles with and without AVAS than for the ICE vehicle. This is compatible with the stronger overestimation of TTC for the electric vehicles under acceleration found in Experiment 1. At high acceleration levels, the probability of a risky crossing decision that would lead to a collision between vehicle and pedestrian if the vehicle would not react by braking was more than 10% higher than the collision probability in interaction with the ICE vehicle. The AVAS somewhat reduced the difference between the electric and the ICE vehicle, but the collision probability for the electric vehicle with AVAS was still significantly higher than for the ICE vehicle. Experiment 3 measured how well the state of positive acceleration of a vehicle can be detected based on only visual information compared to a condition with additional presentation of the vehicle sounds (audiovisual). The data showed that the availability of the vehicle sounds strongly improves the accuracy of the acceleration detection. However, this detection advantage in the audiovisual condition was significantly lower for the electric vehicle without AVAS than for the ICE vehicle, while for the electric car with AVAS it reached almost the same value as for the ICE vehicle. These data confirm our expectation that vehicle sounds are central to the detection of acceleration. This finding suggests that the overestimation of TTC observed in Experiment 1 and the riskier crossing decisions found in Experiment 2 for accelerating electric compared to ICE vehicles could be

partly due to difficulties in detecting that an approaching electric vehicle is accelerating.

Taken together, the experimental data collected in this project show for the first time that auditory information (vehicle sounds) does not only play a role in the acoustic detection of vehicles (when the vehicle is out of the field of view). Rather, vehicle sounds are also relevant for pedestrians when the vehicle is well visible in road crossing situations. We also showed for the first time that the altered acoustic signature of electric vehicles during accelerated approaches represents a potential risk factor for pedestrians in road crossing situations. The aspect of road crossing decisions should be considered in future studies and technical developments in addition to the aspect of vehicle detection, particularly in the design of acoustic warning systems. Further research is needed in the area investigated here, for example on the comparison of a wider range of AVAS variants, on the role of auditory information for road crossing decisions in groups with impaired vision or hearing, or on the question of whether and to what extent the crossing decisions of non-motorized road users in interaction with electric vehicles can be improved by experience or specific training.

1 Einleitung

Um sicher durch den Straßenverkehr zu navigieren, müssen Fußgänger:innen und Radfahrer:innen Kollisionen vermeiden, insbesondere mit Kraftfahrzeugen. Kollisionen von Kraftfahrzeugen mit Fußgänger:innen bilden einen signifikanten Anteil an innerörtlichen Verkehrsunfällen mit Personenschaden (Statistisches Bundesamt, 2017). Um Kollisionen als Fußgänger:in oder Radfahrer:in zu vermeiden, ist es notwendig, die Bewegung von Kraftfahrzeugen einzuschätzen, etwa beim Überqueren einer Straße. Wenn sich ein Fahrzeug nähert, ist ein Überqueren der Fahrbahn nur dann sicher möglich, wenn zum Zeitpunkt des Beginns der Straßenüberquerung die Zeit bis zur Ankunft des Fahrzeugs an der Position der Fußgänger:in (Kontaktzeit; time-to-contact, TTC) länger ist als die für das Überschreiten der Straße notwendige Zeit. Für eine sichere Straßenüberquerungsentscheidung ist also eine ausreichend präzise Einschätzung der Kontaktzeit notwendig (z. B. D. N. Lee, Young, & McLaughlin, 1984; Petzoldt, 2014). Unfälle können unter anderem entstehen, weil die Fußgänger:innen/Radfahrer:innen die Bewegung des sich nähernden Fahrzeugs falsch einschätzen und sich beispielsweise aufgrund einer Überschätzung der Ankunftszeit des Fahrzeugs an ihrer Position entscheiden, die Straße zu überqueren, obwohl nicht genügend Zeit dafür zur Verfügung steht. Für die TTC-Schätzung stehen verschiedene visuelle und auditive Hinweisreize zur Verfügung (Jenison, 1997; Regan & Gray, 2000). Diese Hinweisreize umfassen zum Beispiel die relativen Änderungsraten der visuellen Größe eines sich nähernden Objekts oder der Schallintensität einer sich nähernden Schallquelle, sogenannte tau-Variablen (Hoyle, 1957; D. N. Lee & Young, 1985). Aber auch eine Verrechnung der Distanz und Geschwindigkeit liefert potenziell präzise Informationen über die Kontaktzeit. Dennoch werden selbst für Fahrzeuge, die sich dem Beobachtenden mit konstanter Geschwindigkeit nähern, die Kontaktzeiten oft falsch eingeschätzt (z. B. Caird & Hancock, 1994; Horswill, Helman, Ardiles, & Wann, 2005; Keshavarz, Campos, DeLucia, & Oberfeld, 2017; Oberfeld & Hecht, 2008). Untersuchungen zur visuellen Kontaktzeitschätzung zeigen beispielsweise einen systematischen Effekt der visuellen Größe: bei gleicher objektiver Kontaktzeit wird die Kontaktzeit von kleinen Objekten im Vergleich zu großen Objekten überschätzt. Dieser size-arrival Effekt (DeLucia, 1991) wurde als mögliche Ursache von Kollisionen zwischen Autos und Motorrädern diskutiert (Horswill, et al., 2005).

Im innerörtlichen Verkehr fahren Kraftfahrzeuge nicht ständig mit konstanter Geschwindigkeit, sondern beschleunigen häufig, etwa um eine

grüne Ampelphase nicht zu verpassen, beim Anfahren auf einem Parkplatz oder nachdem der Fahrende auf ein einparkendes Fahrzeug auf seiner Fahrspur warten musste. Für positiv beschleunigte Heranfahrten eines Fahrzeugs (die Geschwindigkeit steigt während der Annäherung an die Fußgänger:in) zeigen Experimente zur *visuellen* Kontaktzeitschätzung, dass die Beschleunigung oft nicht adäquat berücksichtigt und deshalb die Kontaktzeit systematisch überschätzt wird (Benguigui, Ripoll, & Broderick, 2003; Bootsma & Oudejans, 1993; Kaiser & Hecht, 1995; Rosenbaum, 1975). Dies kann in Verkehrssituationen zu riskantem Verhalten in Form von knappen Querungen führen, da die Fußgänger:in die für das Überqueren der Straße zur Verfügung stehende Zeit (bis zum Eintreffen des sich nähernden Fahrzeugs) überschätzt.

Allerdings stehen in realen Verkehrssituation zusätzlich *auditive Informationen* zur Verfügung, die für die TTC-Schätzung genutzt werden können (DeLucia, Preddy, & Oberfeld, 2016; Jenison, 1996; Rosenblum, Wuestefeld, & Saldana, 1993; Schiff & Oldak, 1990). Vor allem über die dynamische Erhöhung der Drehzahl oder das Ansteigen des Schallpegels wird dem zu Fuß Gehenden signalisiert, dass das Fahrzeug beschleunigt. Auch nach umfangreichen Recherchen konnten keine Studien identifiziert werden, die TTC-Schätzungen oder Straßenüberquerungsentscheidungen in Bezug auf beschleunigte Heranfahrten und die Rolle auditiver Informationen untersuchen. Es ist davon auszugehen, dass auditive Informationen über den Fahrzustand des sich nähernden Fahrzeugs die Sicherheit von Fußgänger:innen beim Navigieren durch den Straßenverkehr verbessern.

Hier stellt sich mit zunehmender Verbreitung von Fahrzeugen mit Elektromotor das potenzielle Problem, dass diese zwar sportlich beschleunigen können, dabei aber deutlich weniger Schall als ein Fahrzeug mit Verbrennungsmotor erzeugen. Möglicherweise führt dies zu einem Nicht-Erkennen oder Unterschätzen der Beschleunigung, resultierend in einer Überschätzung der Kontaktzeit, die wiederum riskante Entscheidungen beim Überqueren einer Straße nach sich ziehen kann. Mittlerweile wurde die Frage, ab welcher Entfernung bzw. Kontaktzeit E-Fahrzeuge akustisch detektiert werden können, in verschiedenen Studien untersucht (Grosse, Weber, & Van de Par, 2013; Jacobsen, Ih, Song, & Macdonald, 2016; Parizet, Ellermeier, & Robart, 2014; Steinbach, Altinsoy, & Rosenkranz, 2017; Yasui & Miura, 2016). Die Ergebnisse zeigen, dass die Detektionsdistanz mithilfe von psychoakustischen Modellen relativ gut aus dem Schallpegelverlauf vorhersagbar ist (Grosse, et al., 2013; Jacobsen, et al., 2016). Diese empirischen Daten sind die Basis für gesetzliche Vorgaben für akustische Warnsysteme in E-Fahrzeugen (auditory vehicle alerting system, AVAS), wie sie mittlerweile etwa in der

EU in der UNECE Regelung 138 (UNECE R138, 2017) oder in den USA im NHTSA Federal Motor Vehicle Safety Standard No. 141 (NHTSA 141, 2018) in Kraft sind. Die UNECE Regelung 138 sieht etwa verpflichtend den Einbau eines AVAS in allen neuen E- und Hybrid-Fahrzeugmodellen vor. Das AVAS muss bestimmte Mindestschallpegel erreichen und akustisch Geschwindigkeitsänderungen signalisieren. Allerdings muss es laut der gesetzlichen Vorgaben nur bei Geschwindigkeiten bis 20 km/h aktiv sein, da bei Geschwindigkeiten über 30 km/h die Abrollgeräusche der Reifen das Fahrzeuggeräusch dominieren (Zeller, 2018). Das Verhalten der Fußgänger:innen im Sinne von möglichen Schwierigkeiten mit TTC-Schätzungen und Straßenüberquerungsentscheidungen in der Interaktion mit E-Fahrzeugen (mit und ohne AVAS) wurde jedoch bislang weder generell noch in Bezug auf positiv beschleunigte Heranfahrten untersucht oder einbezogen. Deshalb wurden im vorliegenden Projekt in einer innerörtlichen Verkehrssituation aus Sicht von Fußgänger:innen TTC-Schätzungen (Experiment 1), Entscheidungen in Straßenüberquerungssituationen (Experiment 2) und die Erkennung von positiver Beschleunigung (Experiment 3) zwischen Bedingungen mit sich nähernden E-Fahrzeugen (mit und ohne AVAS) und Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor verglichen. Das Projekt untersucht die Frage, inwiefern die geänderte akustische Signatur des E-Fahrzeugs bei Beschleunigung im Vergleich zu der eines Verbrenners zu Unterschieden in der Verkehrswahrnehmung und im Navigationsverhalten von Fußgänger:innen führt, die mit einem erhöhten potenziellen Unfallrisiko einhergehen könnten und welchen potenziellen Einfluss das AVAS hat.

Für die Untersuchung des Verhaltens von Fußgänger:innen in Straßenüberquerungsentscheidungen wurde aus Gründen der experimentellen Methodik, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit ein interaktiver Virtual-Reality-Ansatz verwendet. Der wichtigste Aspekt ist, dass es in einer naturalistischen Umgebung schwierig ist, Parameter wie die Darbietungsdauer, die Startposition der Fahrzeuge etc. systematisch zu variieren. Daher ist in der Forschung zu TTC-Schätzungen und Straßenüberquerungsentscheidungen die Verwendung von virtuellen Umgebungen der experimentelle Standard. Zweitens besteht bei der Untersuchung von Überquerungsentscheidungen an Straßen in einer naturalistischen Umgebung, in der die Teilnehmer:innen am Rand einer realen Straße stehen (z.B. Guth, Long, Emerson, Ponchillia, & Ashmead, 2013), ein nicht gänzlich auszuschließendes Unfallrisiko. Drittens wäre das Testen einer größeren Stichprobe von Teilnehmer:innen in den aus methodischen Gründen zeitintensiven Versuchen in einem Feldexperiment erheblich kostspieliger als in einem Laborexperiment.

Die Entwicklung und Implementierung eines hochqualitativen audiovisuellen Simulationssystems für die für das Projekt relevanten Verkehrsszenarien war somit eine essenzielle Notwendigkeit und mit größeren Herausforderungen verbunden, da Simulationssysteme dieser Detailtreue bislang nicht zur Verfügung standen. Das von uns implementierte hochleistungsfähige Simulationssystem ermöglicht eine realistische Darbietung der Fahrzeuggeräusche eines Verbrenners, eines E-Fahrzeugs ohne AVAS und eines E-Fahrzeugs mit AVAS sowie eine physikalisch korrekte Simulation des dynamischen räumlichen Schallfelds, welches einem sich nähernden Fahrzeug entspricht. Die Qualität der auditiven Simulation der für das Projekt relevanten Verkehrsszenarien, die mit diesem System erzielt wurde, war erstmalig auf Augenhöhe mit der Qualität der visuellen Simulation. Der Aufbau dieses Simulationssystems wird detailliert in Kapitel 2 erläutert. In den folgenden Kapiteln werden die drei Experimente zu TTC-Schätzungen (Experiment 1), Entscheidungen in Straßenüberquerungssituationen (Experiment 2) und zur Detektion von Beschleunigung (Experiment 3) vorgestellt und dabei jeweils auch die relevanten für die experimentellen Untersuchungen spezifischen Methoden erläutert. Abschließend werden die Befunde der Experimente im Kontext diskutiert und ein Fazit gezogen. Im Anhang sind zusätzliche Analysen zum erlebten Präsenzgefühl während der Experimente zu finden.

2 Design und Implementierung des audiovisuellen Virtual-Reality Systems

Zur Untersuchung der Forschungsfrage wurde ein hoch leistungsfähiges interaktives audiovisuelles Virtual-Reality (VR) System entwickelt und implementiert, welches in seiner Detailgenauigkeit die meisten bislang in der Forschung verwendeten Simulation deutlich übertrifft. Der Aufbau des Simulationssystems wird in diesem Kapitel differenziert beschrieben. Die Information über den detaillierten technischen Aufbau ist jedoch für das Verständnis der Experimente und ihrer Ergebnisse nicht notwendig, so dass Leser:innen, die primär an den Versuchsergebnissen interessiert sind, Kapitel 2 überspringen und bei Kapitel 3 weiterlesen können.

Die auditive Simulation basierte auf akustischen Aufnahmen von realen Fahrzeugen verschiedener Typen – einem konventionellen Verbrenner, eines E-Fahrzeugs ohne AVAS und eines E-Fahrzeugs mit AVAS – auf einer Teststrecke. Somit war sichergestellt, dass realitätsgetreue Fahrzeuggeräusche für jedes der drei untersuchten Fahrzeugtypen dargeboten wurden, was für die Untersuchung des Effekts der akustischen Signatur der Fahrzeugtypen auf die Wahrnehmung und das Verhalten von

Fußgänger:innen von zentraler Bedeutung ist. Für die in den Laborexperimenten untersuchten Verkehrsszenarien wurde mittels einer akustischen Simulationssoftware ein naturalistisches dynamisches räumliches Schallfeld erzeugt (siehe Kap. 2.4). Diese interaktiven auditiven VR-Simulationen wurden mit detailgetreuen visuellen VR-Simulationen der Straßenszenen (siehe Kap. 2.5) kombiniert.

Der Aufbau eines VR-Systems für die korrekte auditive Simulation von Fahrzeugen in einer Straßenszene ist mit mehreren Herausforderungen verbunden. Zwar ändert sich die optische Geometrie eines Fahrzeugs, das sich Beobachter:innen nähert, nicht in Abhängigkeit von Geschwindigkeit oder Beschleunigung und kann daher auf einfache Art und Weise mit in der Computergrafik seit Langem verfügbaren geometrischen Techniken visuell simuliert werden. Im Gegensatz dazu hängt das von einem Fahrzeug dynamisch emittierte Reifengeräusch allerdings von der Geschwindigkeit ab (und natürlich vom Fahrbahn- und Reifentyp). Auch das aerodynamische Geräusch ist von der Geschwindigkeit abhängig. Das Geräusch des Antriebstrangs hängt hingegen vom Motortyp ab und verändert sich dynamisch je nach Motordrehzahl und Motorlast, die wiederum von Faktoren wie dem gewählten Gang, der Beschleunigung und der Fahrbahnneigung usw. abhängen (Zeller, 2018). Eine korrekte auditive Simulation eines sich nähernden Fahrzeugs erfordert demnach die Abbildung der dynamischen Fahrzeuggeräuschquellen. Bisher ist uns auch nach eingehender Recherche kein verfügbares System bekannt, das eine physikalisch korrekte Simulation all dieser Fahrzeuggeräuschquellen ermöglicht. Deshalb wurde im Projekt im ersten Schritt ein Simulationssystem entwickelt, das in einem quellenbasierten Ansatz Aufnahmen von realen Fahrzeuggeräuschen als Schallquellen verwendet und diese Schallquellen in einer auditiven Simulationssoftware dynamisch und interaktiv realisiert. Dieses unseres Wissens derzeit weltweit einzigartige System bietet alle für die empirische Untersuchung der Forschungsfragestellung notwendigen Möglichkeiten der VR-Simulation von Straßenüberquerungsszenarien.

2.1 Akustische Aufnahmen von Fahrten mit und ohne Beschleunigung

2.1.1 Teststrecke

Die Aufnahmen wurden auf der Teststrecke der Technischen Universität Darmstadt durchgeführt, die sich auf dem August-Euler-Flugplatz in Griesheim befindet. Als Fahrbahn diente ein Teilstück der 1100 m langen

und 20 m breiten asphaltierten Start- und Landebahn (siehe Abbildung 1). Alle Aufnahmen fanden bei trockener Fahrbahn statt.

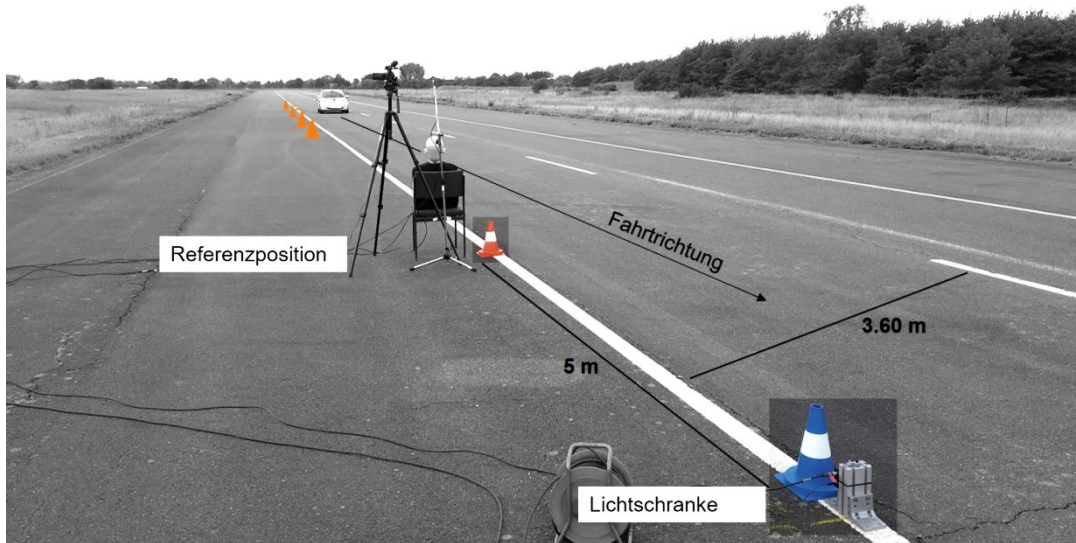


Abbildung 1: Messaufbau an der Teststrecke. Die orangefarbenen Hütchen markieren die Distanz zur Referenzposition und signalisieren dem Testfahrer den Zeitpunkt des Starts der Beschleunigung. Das rote Hütchen markiert die Referenzposition. Das blaue Hütchen markiert die von der Referenzposition 5 m entfernte Lichtschranke, die das Vorbeifahren des Testfahrzeugs registriert.

An der Teststrecke wurde eine Referenzposition auf dem in Fahrtrichtung rechten Rand der rechten Fahrbahnmarkierung definiert und ausgehend von dieser Position die weiteren Aufbauten installiert. In einer Entfernung von 50 cm vom Fahrbahnrand wurden an der Referenzposition ein Kunstkopf (Brüel & Kjaer 4100D) und ein Freifeldmikrofon (Roga MI-17) aufgebaut (siehe Abbildung 2). Der Kunstkopf befand sich in einer Höhe vom 100 cm über der Fahrbahn, das Freifeldmikrofon auf einer Höhe von 165 cm. Die Signale von Kunstkopf und Freifeldmikrofon dienen Kontrollzwecken und werden in den Experimenten dieser Studie nicht verwendet. Zur Markierung der Positionen, an denen bei der Aufnahme der Heranfahrten die Beschleunigung starten sollte, wurden im Abstand von 30 m in Richtung der Startposition des Fahrzeugs Pylone am Fahrbahnrand platziert, sodass diese 30, 45, 60, 75, 90 und 120 m von der Referenzposition entfernt standen. In einem Abstand von 5 m in Fahrtrichtung von der Referenzposition wurde eine Lichtschranke installiert, deren Signal für Kontrollzwecke verwendet wurde.



Abbildung 2: Messaufbau an der Teststrecke. An der Referenzposition (links) befinden sich Kunstkopf und Freifeldmikrofon. Rechts daneben ist die Lichtschranke aufgebaut.

Für die Aufnahmen auf der Teststrecke wurde ein Koordinatensystem definiert, in dem die Position entlang der Straße als x -Achse, die laterale Position als y -Achse und die vertikale Position (Höhe über der Fahrbahn) als z -Achse betitelt wurde (siehe Abbildung 3). Unter Einbezug der GPS-Positionsmessungen ermöglicht diese Systematik das Mapping der Fahrzeugposition, der Position der am Fahrzeug montierten Mikrofone und der Position des Empfängers (Versuchsperson) auf die im Experiment verwendete virtuelle Umgebung.

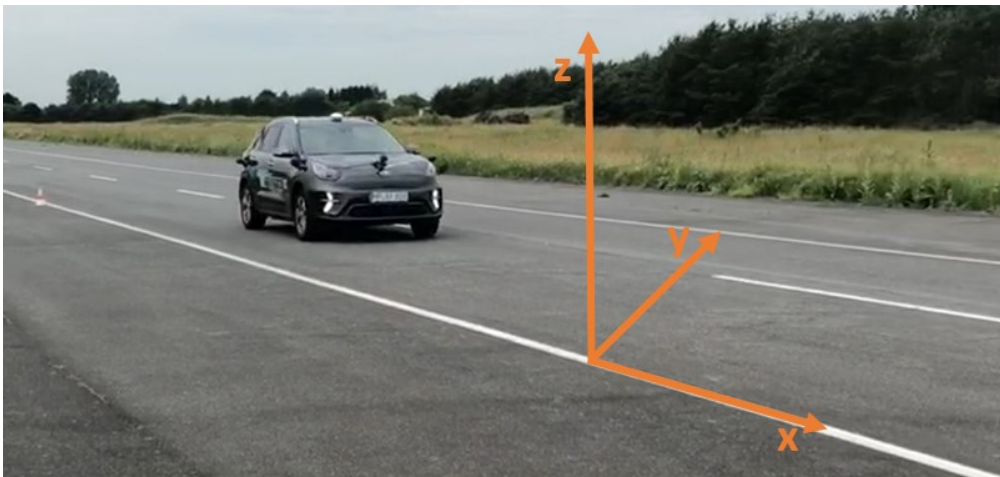


Abbildung 3: Skizzierung des lokalen Koordinatensystems entlang der Teststrecke, das in die virtuelle Straßenszene übertragen wurde. Der Ursprung des Koordinatensystems entspricht der Referenzposition.

2.1.2 Fahrzeuge

Als Fahrzeuge kamen zwei Modelle des Herstellers Kia Motors zum Einsatz. Zum einen wurde der benzinbetriebene Kia Rio 1.0 T-GDI 120 (Baujahr 2019, Dreizylinder, 1.0 l, 88 kW) als „konventionelles“ Fahrzeug mit Verbrennungsmotor eingesetzt (im Folgenden als *Verbrenner* betitelt). Der Verbrenner war mit einem manuellen Schaltgetriebe ausgestattet. Die Reifen des Verbrenners waren Continental Sommerreifen (ContiSportContact 5, 205/45 R17). Zum anderen wurde der Kia e-Niro (Baujahr 2019, 150 kW) als Elektrofahrzeug verwendet (im Folgenden als *E-Auto* bezeichnet). Die Reifen des E-Autos waren Michelin Sommerreifen (Primacy 3, 215/55 R17). Im E-Auto war ein (abschaltbares) akustisches Warngeräuschsystem (AVAS) verbaut (Bezeichnung laut Kia: Virtual Engine Sound System, VESS). Dieses AVAS ist bei Geschwindigkeiten zwischen 0.5 km/h und 28 km/h aktiv und produziert ein harmonisches Warngeräusch, das weniger an einen Verbrennungsmotor als an einen "Raumschiffsound" erinnert. Das AVAS im von uns verwendeten Fahrzeug entsprach von den Klangparametern her bereits UNECE R138, war jedoch an- bzw. abschaltbar. Bei ausgewählten Geschwindigkeitsprofilen wurden Messfahrten sowohl mit aktiviertem als auch mit deaktiviertem AVAS des E-Auto gefahren. Da das AVAS im Kia eNiro nur bis 28 km/h aktiv ist, wurden die Aufnahmen mit eingeschaltetem AVAS jedoch nur bei Geschwindigkeiten bis 28 km/h gemacht (siehe Tabelle 2).

2.1.3 Audioaufnahmesystem

Auf der Teststrecke wurden die Signale der beiden Mikrofone im Kunstkopf, das Freifeldmikrofon sowie die Lichtschranke von einem Audio-Aufnahmesystem aufgezeichnet (Sinus GmbH Soundbook MK1, im Folgenden als *Soundbook Strecke* bezeichnet). Die Aufzeichnung erfolgte mit einer Auflösung von 24 Bit bei einer Samplingfrequenz von $f_s = 51.2$ kHz. Zusätzlich zu den Mikrofonen war ein Audio-Timecodegenerator (Tentacle SyncE) angeschlossen, der mit einem weiteren baugleichen Audio-Timecodegenerator im Fahrzeug synchronisiert war. Außerdem wurden Sensorsignale von einem Windmesser aufgenommen, der in der Nähe der Referenzposition platziert wurde. Bei beiden Fahrzeugtypen wurden am Fahrzeug vier Freifeldmikrofone (Roga MI-17) an folgenden Positionen angebracht: an beiden Fahrzeugseiten über der Achse der Vorderreifen, zentral auf der Motorhaube und auf der rechten Fahrzeugseite über der Achse des Hinterreifens (Tabelle 1). Die verschiedenen Mikrofonpositionen erfassten die Abroll- und Antriebsgeräusche jeweils nahe am Entstehungsort (Reifen bzw. Motorhaube). Somit war eine ganzheitliche und räumlich korrekte

Repräsentation des Geräuschprofils des Fahrzeuges im Experiment möglich.

Die am Fahrzeug angebrachten Mikrofone waren mit einem Sinus-Soundbook MK2 Audiomeßsystem verbunden, das sich im Fahrzeug befand. Am Soundbook waren außerdem ein Garmin GPS-Empfänger und ein Tentacle SyncE Audio-Timecodegenerator angeschlossen. Durch die Signale des angeschlossenen GPS-Empfängers wurde die Systemzeit des Soundbooks mit der GPS-Zeit synchronisiert, so dass der präzise zeitliche Bezug der Audioaufnahmen zu den aufgezeichneten GPS-Positionsdaten im Javad GPS-Empfänger hergestellt werden konnte.

Tabelle 1: Positionen der am Fahrzeug montierten Mikrofone bei Verbrenner und E-Auto.

Signalquelle	Höhe (Abstand von der Fahrbahn) [cm]	Abstand auf der Längsachse von der Fahrzeugfront [cm]	horizontaler Abstand zur Längsachse [cm]	Abstand von der Karosserie [cm]
Verbrenner				
Vorderreifen rechts	86	89	91	4
Vorderreifen links	86	87	91	4
Motorhaube	93	19	0	
Hinterreifen rechts	87	333	91	6
E-Auto				
Vorderreifen rechts	100	86	92	10
Vorderreifen links	101	88	92	10
Motorhaube	100	14	0	
Hinterreifen rechts	99	357	92	11

2.1.4 GPS-Positionstracking

Mittig auf dem Fahrzeugdach wurde eine GPS-Antenne (Trimble AG25) installiert, die mit einem professionellen GPS-Empfänger (JAVAD Triumph LS) im Fahrzeuginneren verbunden war. Unter der Verwendung des Real Time Kinematic (RTK) Verfahrens konnte die GPS-Position des Fahrzeuges auf der Teststrecke bis auf einige Zentimeter genau aufgezeichnet werden. Die hohe Präzision des Verfahrens wird durch eine Auswertung der Trägerphase, die Verarbeitung von Signalen von mindestens 5 Satelliten

und einen Abgleich der Daten des mobilen Empfängers mit den Daten einer geostationären Referenzstation erzielt. Wir verwendeten eine im Rahmen von SAPOS-GPPS des Hessischen Landesamts für Bodenmanagement und Geoinformation zur Verfügung gestellte Referenzstation, die auf dem Dach eines Gebäudes der TU Darmstadt positioniert ist (Entfernung zur Teststrecke ca. 6 Kilometer).

Das Post-Processing der GPS-Rohdaten aus dem Javad Empfänger und von der Referenzstation wurde mittels der RTKLIB Toolbox (<http://www.rtklib.com/>) durchgeführt. Im Positioning Mode "Kinematic" wurde ein erweiterter Kalman Filter vorwärts und rückwärts auf die Zeitreihe der GPS-Daten angewendet. An jedem Zeitschritt in den GPS-Daten wurde dann der arithmetische Mittelwert der beiden Filterdurchläufe verwendet. Die errechneten GPS-Positionen wurden auf Basis des World Geodetic Systems (WGS-84) in Positionen in einem lokalen Koordinatensystem umgerechnet. Der Ursprung dieses Koordinatensystems entspricht der Referenzposition auf der Teststrecke (siehe Abbildung 3). Die x-Koordinate gibt die Position der Mitte der Fahrzeugfront relativ zur Referenzposition parallel zum Straßenverlauf in Fahrtrichtung an. Bei der Berechnung wurde der horizontale Abstand der auf dem Dach montierten GPS-Antenne zur Fahrzeugfront berücksichtigt. Die y-Koordinate gibt die Entfernung der Mitte der Fahrzeugfront relativ zur Referenzposition senkrecht zum Straßenverlauf und in Richtung der anderen Straßenseite an. Die z-Koordinate beschreibt die Höhe der GPS-Antenne über der Fahrbahn, wird jedoch in diesem Projekt nicht verwendet, da die Strecke näherungsweise eben verlief. Neben den Positionsdaten wurden aus den GPS-Rohdaten an jedem Zeitpunkt der Geschwindigkeitsvektor und der Beschleunigungsvektor in demselben Koordinatensystem berechnet. Die im Soundbook im Auto aufgezeichneten GPS-Daten wurden lediglich zu Synchronisations- und Kontrollzwecken verwendet. Sie wurden ebenfalls in das lokale Koordinatensystem transformiert.

Die Aufzeichnungsrate des JAVAD GPS-Empfängers betrug 10 Hz, die GPS-Aufzeichnungsrate im Soundbook im Auto betrug 1 Hz. Die Positions-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektoren wurden mittels Spline-Interpolation (Matlab Funktion *interp1*) auf eine Aufzeichnungsrate von 1000 Hz interpoliert, um nachfolgende Berechnungen präziser durchführen zu können.

2.2 Qualitätskontrolle und Auswahl der Stimuli

Bei der Aufnahme der akustischen Signaturen wurden verschiedene Fahrprofile der Fahrzeugtypen angestrebt, um eine realitätsnahe Variation von innerstädtischen Fahrprofilen in den Experimenten darbieten zu

können. Für die Konstantfahrten sollten Geschwindigkeiten von 10, 20, 30, 40, 50 und 60 km/h gefahren werden. Für die Beschleunigungsfahrten sollten verschiedene Ausgangsgeschwindigkeiten (10, 20, 30, 40 km/h) und Beschleunigungsstärken (0.6 und 2.0 m/s²) realisiert werden. Die präzise Umsetzung von Fahrprofilen mit exakt konstanten Geschwindigkeiten bzw. Beschleunigungen ist fahrtechnisch schwierig. Außerdem gab es bei den Aufnahmen auf der Teststrecke eine Vielzahl von akustischen Störquellen. Insbesondere traten trotz Windschutz auf allen Mikrofonen häufig starke Windgeräusche in den Audioaufnahmen auf. Externer Störschall kam vor allem von Flugzeugen (Griesheim liegt im Einzugsbereich des Frankfurter Flughafens), aber auch von Kirchenglocken, landwirtschaftlichen Nutzfahrzeugen etc.

Für jede der auf der Teststrecke gewonnenen Aufnahmen wurden das gefahrene Geschwindigkeitsprofil sowie die Audiosignale aller Mikrofone am Fahrzeug manuell kontrolliert. Fahrten mit starken Abweichungen vom intendierten Fahrprofil oder deutlichen Störgeräuschen wurden für die experimentelle Untersuchung ausgeschlossen. Von den insgesamt aufgezeichneten 327 Fahrten konnten letztlich nur 93 für die Experimente ausgewählt werden (siehe Tabelle 2). Das Vorgehen bei Qualitätskontrolle und Stimuluselektion wird im Folgenden beschrieben.

2.2.1 Begutachteter Zeitabschnitt der Aufnahmen

Wir bezeichnen den Zeitpunkt, an dem die Front des Fahrzeugs die Referenzposition erreichte, mit t_{Ref} und den Zeitpunkt, an dem bei Beschleunigungsfahrten die Beschleunigung einsetzte, mit $t_{accOnset}$. Bei der Qualitätskontrolle der Aufnahmen wurde bei Fahrten mit konstanter Geschwindigkeit ein Zeitabschnitt von 30 Sekunden vor Erreichen der Referenzposition begutachtet, also das Zeitintervall $[t_{Ref} - 30 \text{ s}, t_{Ref}]$. Bei den Beschleunigungsfahrten wurden die Aufnahmen im Zeitabschnitt zwischen 3 Sekunden vor Beschleunigungsbeginn ($t_{accOnset} - 3 \text{ s}$) und 5 Sekunden nach Beschleunigungsbeginn begutachtet ($t_{accOnset} + 5 \text{ s}$). Bei Detektion von Störgeräuschen oder zeitweisen zu starken Abweichungen vom intendierten Geschwindigkeitsprofil wurde die Aufnahme, wenn möglich, auf einen den Qualitätskriterien entsprechenden Zeitabschnitt reduziert oder, wenn dies nicht möglich war, ausgeschlossen.

2.2.2 Qualitätskriterien für das gefahrene Geschwindigkeitsprofil

Hinsichtlich der bei den Aufnahmen gefahrenen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen erfolgte die Auswahl der verwendbaren Aufnahmen in einem zweistufigen Prozess. Ziel war es pro Geschwindigkeitsprofil und

Fahrzeugtyp (siehe Tabelle 2) mindestens drei verschiedene akustische Aufzeichnungen für die Experimente zur Verfügung zu haben. Bei den auf der Teststrecke gemachten Aufnahmen gab es jeweils unvermeidbare leichte Abweichungen der tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen von den intendierten Fahrprofilen. Außerdem traten bei der Aufnahme im Feld verschiedene Störgeräusche auf, wie oben diskutiert. Durch die Verwendung von mindestens drei akustischen Aufnahmen pro Kombination aus Geschwindigkeitsprofil und Fahrzeugtyp wurde vermieden, dass es systematische Einflüsse spezifischer Abweichungen vom intendierten Geschwindigkeitsprofil bzw. spezifischer Störgeräusche gab. Da auch in einer realen Verkehrssituation sich Fahrzeuge normalerweise nicht mit beispielsweise exakt konstanter Geschwindigkeit bewegen, erhöhen die leichten Abweichungen in den Aufnahmen im gewissen Sinne auch die ökologische Validität der Stimuli. Für die Auswahl der Aufnahmen wurde zunächst ein Basiskriterium festgelegt und angewandt, das im relevanten Zeitabschnitt (siehe 2.2.1) eine Abweichung um 10% von der intendierten Geschwindigkeit und Beschleunigung tolerierte. Nach Anwendung des Basiskriteriums für Geschwindigkeitsprofile waren allerdings für gewisse Bedingungen nicht ausreichend viele akustische Aufnahmen verfügbar. Mit dem Folgekriterium, das eine Abweichung um 20% von der idealen Geschwindigkeit und Beschleunigung des jeweiligen Fahrprofils tolerierte, wurde in diesen Fällen die Stimulusselektion für die entsprechenden Geschwindigkeitsprofile erweitert. Darüber hinaus tolerierte das Folgekriterium in seltenen Fällen technisch bedingte stärkere Abweichungen von mehr als 20% von der intendierten, konstanten Beschleunigung. Solche Abweichungen waren beim Verbrenner, der mit manuellem Schaltgetriebe ausgestattet war, in gewissen Fahrbedingungen unvermeidlich, da beim Schaltvorgang zunächst ein deutlicher Rückgang der Beschleunigung auftrat, gefolgt von einer zunächst zu hohen Beschleunigung. Dieses nicht-konstante Beschleunigungsverhalten entspricht der üblichen Fahrdynamik von Verbrennern, insbesondere solchen mit manueller Schaltung. In Tabelle 2 ist u.a. die Anzahl der Aufnahmen, die einen Schaltvorgang beinhalten, für jedes Geschwindigkeitsprofil des Verbrenners aufgeschlüsselt. Zusammengefasst wurde durch die angewandten Qualitätskriterien sichergestellt, dass nur Fahrten mit relativ kleinen Abweichungen zwischen den intendierten und den tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeitsprofilen im Experiment dargeboten wurden.

2.2.3 Qualitätskriterien für die Audiosignale

Die Qualität der Audiosignale wurde sowohl für jede einzelne akustische Aufnahme von den am Auto befestigten vier Mikrofonen als auch für das in der akustischen Simulation zusammengeführte Audiosignal einer Fahrt beurteilt. Dabei galt grundsätzlich das Kriterium, dass die jeweiligen Audiosignale auf das Auto zurückzuführen sein mussten. Dezentere Hintergrundgeräusche durch von der Fahrbahn hochgeschleuderte Steinchen oder leises Vogelgezwitscher wurden toleriert. Zeitbereiche in den Aufnahmen mit dominanten Störgeräuschen durch z.B. Windgeräusche oder Flugzeuge wurden hingegen ausgeschlossen. Tabelle 2 zeigt die Anzahl der pro Geschwindigkeitsprofil und Fahrzeugtyp zur Verfügung stehenden Aufnahmen nach Selektion geeigneter zugehöriger Geschwindigkeitsprofile und Audiosignale.

Die ausgewählten akustischen Aufnahmen wurden im Kontext der Experimente in einem akustisch optimierten Laborraum präsentiert. Der genaue Laboraufbau ist im nächsten Abschnitt dargestellt. Die spezifische verwendete auditive Simulation wird in Abschnitt 2.4 genauer erläutert.

Tabelle 2: Anzahl der selektierten akustischen Aufnahmen pro Geschwindigkeitsprofil und Fahrzeugtyp. Die Zahl in Klammern gibt die Anzahl der Aufnahmen mit fahrtechnisch bedingtem Schaltvorgang des Verbrenners an.

Geschwindigkeitsprofil		Fahrzeugtyp		
a [m/s ²]	v_0 [km/h]	Verbrenner	E-Auto	E-Auto mit AVAS
0.0	10	3 (0)	2	2
0.0	20	2 (0)	3	3
0.0	30	1 (0)	4	
0.0	40	2 (0)	2	
0.0	50	2 (0)	1	
0.6	10	3 (2)	3	3
0.6	20	3 (0)	1	1
0.6	30	6 (0)	2	
0.6	40	3 (0)	2	
2.0	10	3 (3)	3	4
2.0	20	6 (0)	3	
2.0	30	3 (0)	2	
2.0	40	1 (0)	1	

2.3 Laboraufbau

In den Experimenten wurde ein räumliches Schallfeld mittels 2D Ambisonics 7. Ordnung erzeugt (Ahrens, Rabenstein, & Spors, 2014; Daniel, 2000; Gerzon, 1985). Der Ambisonics Ansatz geht von einer Wiedergabe im akustischen Freifeld aus. Bei der Gestaltung der Laborräumlichkeit lag deshalb besonderes Augenmerk auf Maßnahmen, die akustische Reflexionen minimieren. So wurde die rechteckige Laborfläche (Maße: 570 cm x 450 cm) mittels Traversen und daran befestigten schallabsorbierenden Akustikvorhängen (Gerriets Bühnenvelours Ascona 570; 570g/m²; Absorptionskoeffizient von 0.95 bei Frequenzen über 400 Hz; [Herstellerlink](#)) abgetrennt. An den Traversen wurden zudem die Basisstationen der HTC Vive Pro (siehe 2.3.3) montiert, die für das Motion Tracking Lasersignale aussenden. Die angrenzende

Laborwand und die Labordecke wurden mit 10 cm dicken Akustikschaumstoffplatten aus Basotect ausgekleidet (BASF; Absorptionskoeffizient von 0.9 bei Frequenzen über 400 Hz; [Herstellerlink](#)). Innerhalb der rechteckigen Laborfläche wurde ein Array aus 16 Lautsprechern (Genelec 8020DPM-7) kreisförmig aufgebaut (siehe Abbildung 4). Der Radius betrug 2.0 m, der minimale Abstand der Lautsprecher zur Wand ca. 40 cm und der minimale Abstand zum Akustikvorhang ca. 20 cm. Ausgehend vom Mittelpunkt des kreisförmigen Experimentalbereichs wurden alle Lautsprecher in einem gleichmäßigen Winkelabstand von 22.5° ausgerichtet. Die Hochtöner der Zwei-Wege Lautsprecher befanden sich 160 cm über dem Fußboden und somit nahe an der mittleren Ohrhöhe von erwachsenen Personen. Dabei orientierte sich die Schätzung der mittleren Ohrhöhe an der durchschnittlichen Augenhöhe aufrecht stehender erwachsener Personen ($M_{female} = 151.61$ cm, $M_{male} = 163.39$ cm) (Gordon et al., 1989). Auf dem Boden wurde innerhalb des Lautsprecher-Arrays hochfloriger Teppichboden verlegt (IKEA Stoense), der weitestgehend auch die Standfüße der Lautsprecherstative bedeckte.

Die Monitore und Computer zur Steuerung des Experiments befanden sich angrenzend an das Lautsprecher-Array. Sie wurden ebenfalls mit 10 cm dicken Akustikschaumstoffplatten aus Basotect abgeschirmt.



Abbildung 4: Array aus 16 kreisförmig angeordneten Lautsprechern zur auditiven Darbietung des räumlichen Schallfelds im Labor (Ambisonics 7. Ordnung).

2.4 Auditive Simulation

Die auditive Wiedergabe wurde mittels des Ambisonics Lautsprecher-Arrays realisiert (siehe Abbildung 4). Die Audiosignale wurden von einer RME HDSPe RayDAT Audiokarte per ADAT Kabel an den Audio-Wandler (Ferrofish Pulse 16, 24 bit, $f_s = 44.1$ kHz) übertragen, der alle 16 Lautsprecher einzeln ansteuerte.

Die physikalisch korrekte auditive Simulation von sich bewegenden Schallquellen im experimentellen Setting wurde mittels der Software TASCAR (Toolbox for Acoustic Scene Creation and Rendering) realisiert (Grimm, Luberadzka, & Hohmann, 2019; <http://www.tascar.org/>). TASCAR bietet eine dynamische Verarbeitung der Geometrie der akustischen Szene (zeitlich variable Positionen von (Spiegel-)Schallquellen, Absorbern und Empfängern), akustische Modellierung und Schallfeldsynthese. TASCAR modelliert die Richtcharakteristik von Schallquellen, die durch spherical spreading und Luftabsorption bedingte entfernungsabhängige Änderung des Schallpegels und die entfernungsabhängige Schalllaufzeit (die z.B. zu Dopplereffekten führen kann). Schallreflexionen am Boden und anderen Oberflächen werden mittels der Spiegelschallquellenmethode (Allen & Berkley, 1979) simuliert. Die Verarbeitung der dynamischen Geometrie der akustischen Szene basierte auf den bei den akustischen Aufnahmen aufgezeichneten GPS-Positionsdaten. Die Signale der vier Mikrofone wurden als vier Punktschallquellen in der Simulation verwendet. Dabei entsprach die Position der Schallquellen relativ zur Mitte der Fahrzeugfront den Positionen bei der Aufnahme (siehe Tabelle 1). Die Höhe der Mikrofone über den Radachsen wurde auf 0 cm über dem Boden festgelegt. Dies entspricht zum einen der anzunehmenden Entstehungsposition des Reifengeräusches (Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn). Zum anderen zeigte ein Hörvergleich der mit TASCAR erzeugten Simulationen und der auf der Strecke gemachten Kunstkopfaufnahmen in einigen ausgewählten Bedingungen, dass zu starke Kammfiltereffekte auftraten (schmalbandige Einbrüche im Frequenzspektrum, die durch die Überlagerung von leicht phasenverschobenem Direktschall und reflektiertem Schall entstehen), wenn die den Mikrofonen über den Achsen zugeordneten Schallquellen auf eine größere Höhe über der Fahrbahn gesetzt wurden.

Die Startposition des Fahrzeugs wurde zu Beginn jedes Trials festgelegt, indem die Positionsinformation mittels Open Sound Control Protokoll (OSC; <http://opensoundcontrol.org>) über eine Ethernetverbindung an TASCAR kommuniziert wurde. Um die akustische Simulation zu vereinfachen, war die simulierte Empfängerposition innerhalb jedes Trials statisch, wurde also nicht anhand von Motion-Tracking Daten dynamisch variiert. Dies

entsprach jedoch auch der Versuchssituation, in der sich die Versuchsperson während eines Trials höchstens wenige Zentimeter von der instruierten Standposition am Straßenrand wegbewegte. Die simulierte Empfängerhöhe wurde an die individuelle Ohrhöhe der Versuchsperson angeglichen. Die Geometrie der akustischen Szene (Position der Schallquellen) wurde alle 5.8 ms aktualisiert ($f_s = 44.1$ kHz, Audioblockgröße 256 Samples). Das dynamische räumliche Schallfeld an der simulierten Position der Versuchsperson wurde mittels 2D Ambisonics 7. Ordnung erzeugt (Daniel, 2000; Gerzon, 1985). Dieses auf spherical harmonics basierende Verfahren zur Schallfeldsynthese hat den Vorteil, dass durch das an der Position der Versuchsperson erzeugte räumliche Schallfeld die Versuchsperson wie gewohnt die akustische Szene mittels Kopfbewegungen explorieren kann, ohne dass ein Head Tracking notwendig ist. Die virtuelle auditive Szene (räumliche Position der Schallquellen) änderte sich also – wie in der Realität – in Abhängigkeit von Kopfbewegungen der Versuchsperson.

Dieser Ansatz für die auditive Simulation und Wiedergabe ermöglichte eine plausible, auf physikalischer Modellierung basierende dynamische und interaktive Simulation der Heranfahrt eines Fahrzeugs. Die Quellensignale waren die auf der Teststrecke gewonnenen Audioaufnahmen der Fahrzeuggeräusche. In der auditiven Simulation bzw. der Ambisonics-Wiedergabe wurden alle relevanten dynamischen akustischen Effekte einer bewegten Schallquelle modelliert. Dies umfasste die dynamische entfernungsabhängige Variation des Schallpegels, die dynamische Änderung binauraler Cues (interaurale Zeitdifferenz, interaurale Pegeldifferenz, richtungsabhängige spektrale Effekte durch die kopfbezogene Übertragungsfunktion), zeitlich variierende Kammfiltereffekte (die durch die Überlagerung von Direktschall und reflektiertem Schall entstehen können) und zeitlich variable Doppler-Frequenzverschiebungen. TASCAR lief auf einem Computer mit Linux Betriebssystem (Ubuntu 64 bit 18.04.3 LTS, GNOME 3.28.2, Prozessor: Intel® Core i9-9900K CPU @ 3.60 GHz x 16, Grafikkarte: Quadro P1000/PCIe/SSE2). Als Audiotool wurde JACK (Version 0.6.0; <https://jackaudio.org/>) verwendet.

Die akustische Kalibrierung erfolgte mithilfe des TASCAR Speaker Calibration Tools und eines in der Mitte des Lautsprecher-Arrays auf Ohrhöhe (165 cm über dem Fußboden) aufgestellten Schallpegelmessgeräts (Norsonic Nor131 mit Roga MP40 Freifeldmikrofon und GRAS 12AX Mikrofon-Speisegerät). Bei der Kalibrierung wurden Pegelunterschiede zwischen den 16 Lautsprechern ausgeglichen und die Schalldruckpegel einer Punktschallquelle und eines diffusen Schallfelds kalibriert.

2.5 Visuelle Simulation

Die Versuchsperson erlebte die virtuelle visuelle Umgebung über ein Head-Mounted Display (HMD) (HTC Vive Pro; [Herstellerlink](#)). Das HMD präsentierte die virtuelle visuelle Umgebung stereoskopisch über zwei AMOLED Displays mit jeweils einer Diagonalen von 3.5“ und einer Auflösung von 1440 × 1600 Pixeln pro Auge (Gesamtauflösung: 2880 × 1600 Pixeln, Bildwiederholungsrate: 90 Hz). Das Sichtfeld des HMD betrug 110°. Die zur HTC Vive Pro gehörigen Kopfhörer wurden für das Experiment demontiert.

Die HTC Vive Pro erfasste mittels laserbasiertem Tracking die Kopfposition der Versuchsperson im Experimentalbereich. Durch das Head- und Motion-Tracking wurden reale (Kopf-)Bewegungen der Versuchsperson in die virtuelle visuelle Umgebung übertragen, so dass die Versuchsperson sich in der virtuellen visuellen Umgebung – wie in der Realität – bewegen bzw. umschauen konnte. Die Versuchsperson stand im Mittelpunkt des Lautsprecher-Arrays. In dieser Position befand sie sich in der virtuellen Szene 1 m von der rechten Bordsteinkante entfernt. Die Höhe der virtuellen Kamera über dem simulierten Boden entsprach der durch das Head-Tracking erfassten realen Augenhöhe der Versuchsperson.

Vizard lief auf einem Computer mit Windows 10 Pro Betriebssystem (Intel® Core i9-9900X CPU @ 3.50 GHz, Grafikkarte: Nvidia Quadro RTX 4000). Die Software übernahm auch die Steuerung des Experimentablaufs (Auswahl und Darbietung von Trials, Erfassung der Antworten der Versuchsperson, Speicherung der Trialdaten). Per OSC Protokoll wurden über eine Ethernetverbindung Kommandos zur Szenenauswahl und Startsignale an TASCAR übertragen, sodass die auditive und die visuelle Simulation zeitlich synchronisiert waren.

2.6 Simulierte Verkehrsszenarien

In den Experimenten wurden virtuelle audiovisuelle Straßenszenen präsentiert, die ein sich näherndes Fahrzeug zeigten. Dabei bewegte sich das Fahrzeug in einigen Bedingungen mit konstanter Geschwindigkeit ohne Beschleunigung (*Konstantfahrten*, $a = 0 \text{ m/s}^2$), während das Fahrzeug in anderen Bedingungen zunächst mit einer konstanten Ausgangsgeschwindigkeit v_0 fuhr und anschließend beschleunigte (*Beschleunigungsfahrten*, $a = 0.6 \text{ m/s}^2$ oder 2.0 m/s^2).

Die visuelle virtuelle Straßenszene zeigte eine innerstädtische, zweistreifige Straße (Länge ca. 300 m, Breite 6.5 m, Fahrstreifenbreite 3.25 m) ohne Biegungen oder Kurven sowie eine gleichmäßige, lückenlose Bebauung am Straßenrand (siehe Abbildung 5). Als Vorbild diente dabei die Eislebener

Straße in Berlin. Der Abstand der Häuserfront auf der rechten Fahrbahnseite zur rechten Fahrstreifenmarkierung betrug 8.4 m, der Abstand der Häuserfront auf der linken Fahrbahnseite zur rechten Fahrstreifenmarkierung betrug 15.6 m. Das 3D-Modell basierte auf 3D Daten der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen der Stadt Berlin ([Link](#)). Die virtuelle Straßenszene umfasste – anders als im Original – keine am Straßenrand befindlichen Fahrzeuge, Fahrräder, Passanten, Stromverteilerkästen, Schilder, Bäume, Parkscheinautomaten, o.Ä. Das heißt, sie enthielt lediglich eine asphaltierte Fahrbahn, den Bürgersteig inklusive Bordstein, Straßenlaternen und Häuser. Hinzugefügt wurden weiße Fahrbahnmarkierungen sowie eine blaue Linie, die sich quer über die gesamte Straße und Bordsteine erstreckte. Die Linie wurde in einem Abstand von 50 cm links neben dem virtuellen Versuchspersonenstandpunkt platziert und diente der Orientierung in der virtuellen visuellen Umgebung.

Zudem war in der virtuellen Straßenszene ein sich der Versuchsperson näherndes, rotes Fahrzeug mit einem Avatar am Steuer sichtbar. Die Gestaltung des virtuellen Fahrzeuges orientierte sich am Mitsubishi Colt der 6. Generation (Länge 3810 mm, Breite ohne Spiegel 1895 mm, Höhe 1520 mm). Der im Auto sitzende Avatar wurde mit der Software Make Human (Version: 1.2.0) erstellt: er ist 26 Jahre alt, 178 cm groß und hat einen neutralen Gesichtsausdruck. Mithilfe von Blender (2.81a) wurde der erstellte Avatar extrahiert und mittels 3DS Max (2020.2) ins virtuelle Auto gesetzt.

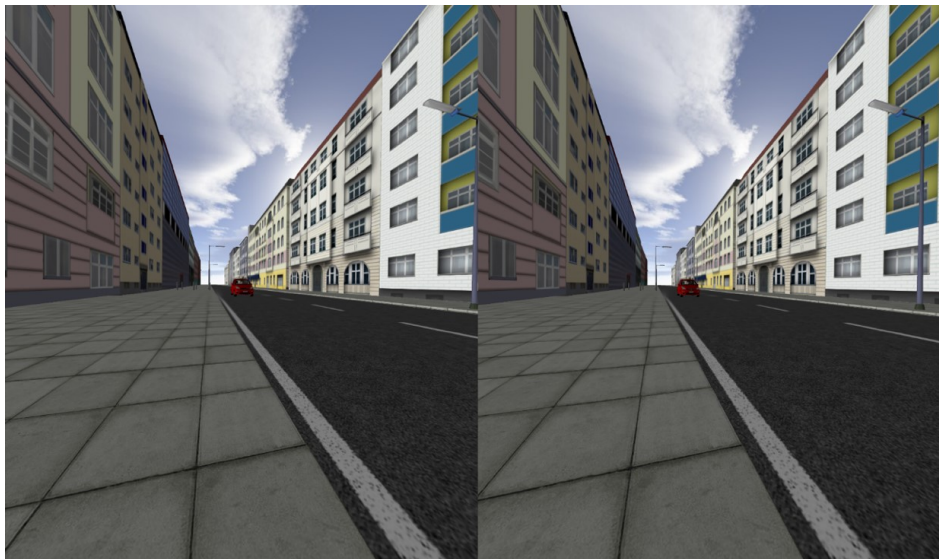


Abbildung 5: Stereoskopische Ansicht der virtuellen Verkehrsszene mit zweistreifiger Straße

Die simulierte auditive Straßenszene entsprach von ihrer Geometrie her (ebene Straßenfläche, zwei parallele vertikale Häuserfronten) der visuellen Szene. Die simulierten Bodenflächen und Häuserfronten wurden in der akustischen Szene mit plausiblen akustischen Reflexionseigenschaften versehen. Für die Bodenfläche betrug der Reflexionsgrad $\rho = I_r/I_0 = 1.0$, wobei I_r die akustische Intensität der reflektierten Schallwelle und I_0 die Intensität der einfallenden Welle ist. Für die Häuserfronten betrug der Reflexionsgrad gemäß der Empfehlung in DIN ISO 9613-2:1999-10 (1999) $\rho = 0.8$. Die Schallreflexionen wurden mit einem IIR Tiefpass erster Ordnung mit einer Grenzfrequenz von 5 kHz modelliert (der Tascar-Parameter *damping* wurde auf den Wert 0.5 gesetzt). Die Schallstreuung (zufällige Abweichungen des Ausfallwinkels bei der Schallreflexion) wird in der Simulationssoftware TASCAR durch den Parameter *scattering* kontrolliert, der auf den Wert 0.5 gesetzt wurde. In einer realen Umgebung entsteht die Schallstreuung durch Unebenheiten in den reflektierenden Flächen.

Die Heranfahrten des Fahrzeugs wurden jeweils wie oben beschrieben (2.4) akustisch simuliert. Zusätzlich wurde als Hintergrundgeräusch eine Ambisonics Aufnahme erster Ordnung aus einer ruhigen Wohngegend dargeboten ($L_{Aeq} = 37.5$ dB).

3 Experiment 1: TTC-Schätzung im Prediction-Motion Paradigma

Für die unbeschadete Straßenüberquerung als Fußgänger:in ist neben der Detektion von sich nähernden Fahrzeugen auf Kollisionskurs die Einschätzung relevant, wie viel Zeit bis zu einer möglichen Kollision verbleiben würde (TTC-Schätzung). Die TTC-Schätzung ist Grundlage für die Entscheidung, ob die Straße noch unbeschadet vor einem sich nähernden Fahrzeug auf Kollisionskurs überquert werden kann oder nicht. In Experiment 1 war die Frage zentral, ob und inwiefern sich die unterschiedlichen akustischen Signaturen von Verbrennern und E-Fahrzeugen (mit und ohne AVAS), insbesondere bei Beschleunigung, in Unterschieden in den TTC-Schätzungen niederschlagen. Diese Frage wurde in der Literatur bislang weder mit detailgetreuen audiovisuellen Darbietungen von sich nähernden Fahrzeugen bei konstanter Geschwindigkeit noch für den Fall positiver Beschleunigung der Fahrzeuge untersucht.

3.1 Methode

3.1.1 Versuchsbedingungen und Design

Die Versuchspersonen standen in der Mitte des Lautsprecher-Arrays (siehe Abbildung 4), trugen das HMD und beobachteten die oben beschriebene virtuelle städtische Straßenszene (siehe Abbildung 5), wobei sie in der Simulation einen Meter von der rechten Bordsteinkante der zweistreifigen Straße entfernt standen. Dabei näherte sich ihnen ein einzelnes Fahrzeug von der linken Seite. Nach einer sicht- und hörbaren Präsentationsdauer von 5 s verschwand das Fahrzeug vom Display und war nun weder zu sehen noch zu hören. Das Verschwinden des Fahrzeuges wird im Folgenden mit *Okklusion* bezeichnet. Die Versuchspersonen waren aufgefordert, per Knopfdruck den Zeitpunkt anzugeben, an dem das Fahrzeug mit dem jeweiligen Fahrprofil an ihrer Position angekommen wäre, wenn es nach der Okklusion seine Bewegung in der derselben Art und Weise wie in der sicht-hörbaren Phase fortgesetzt hätte. Diese "Prediction Motion" Aufgabe (z.B. Schiff & Detwiler, 1979) ist eines der in der Forschung zur TTC-Schätzung am häufigsten eingesetzten Versuchsparadigma.

Es wurden verschiedene Fahrprofile von Fahrzeugen mit Verbrennungs- und Elektromotor (mit und ohne AVAS) dargeboten. Dafür wurden die nominale Ausgangsgeschwindigkeit v_0 (vor Beschleunigungsbeginn) und die nominale Beschleunigung a variiert. In den Konstantfahrtbedingungen ($a = 0 \text{ m/s}^2$) betrug die Geschwindigkeit $v_0 = 10, 20, 30, 40$ bzw. 50 km/h . In den Beschleunigungsfahrtbedingungen ($a = 0.6 \text{ m/s}^2$ oder 2.0 m/s^2) betrug die Ausgangsgeschwindigkeit $v_0 = 10, 20, 30$ bzw. 40 km/h . Das AVAS war bei Geschwindigkeiten bis zu 28 km/h aktiv.

Tabelle 2 zeigt die Anzahl der verfügbaren akustischen Aufnahmen für jede der Kombinationen dieser beiden Fahrprofilparameter für jeden der drei Fahrzeugtypen (Verbrenner, E-Auto ohne AVAS, E-Auto mit AVAS).

Für jede der 31 Kombinationen aus Geschwindigkeitsprofil und Fahrzeugtyp wurden TTCs von 2.0, 3.5 und 5.0 s dargeboten. Die TTC wurde als das Zeitintervall zwischen der Okklusion (dem Verschwinden des Fahrzeuges vom Display) und dem Zeitpunkt definiert, an dem das Fahrzeug am Standort der Versuchsperson angekommen wäre, wenn es seine Bewegung in derselben Art und Weise wie während der sicht-/hörbaren Phase (also mit derselben Geschwindigkeit bzw. Beschleunigung wie am Ende der Präsentationsphase) fortgesetzt hätte.

Ausgehend von einer durchschnittlichen Gehgeschwindigkeit einer Fußgänger:in von 1.44 m/s (Ishaque & Noland, 2008) würde es 2.26 s dauern, den 3.25 m breiten rechten Fahrstreifen der simulierten Straße zu

überqueren. Dementsprechend würde die Initiierung einer Straßenüberquerung bei einer TTC von 2.0 s zu einer Kollision zwischen Fußgänger:in und Fahrzeug führen. Bei einer TTC von 3.5 s würde die Fußgänger:in den rechten Fahrstreifen, auf dem sich das Fahrzeug nähert, überqueren können, ohne mit dem Fahrzeug zu kollidieren. Bei einer TTC von 5.0 s könnte die Fußgänger:in beide Fahrstreifen überqueren, bevor das Auto an seinem Standort ankommt. Folglich würde auch hier eine Kollision ausbleiben.

Jede der aus dem Design resultierenden 31 (Geschwindigkeitsprofil) \times 3 (TTC) = 93 Versuchsbedingungen wurden in jedem der insgesamt sieben Experimentalblöcke genau ein Mal präsentiert. Die Reihenfolge innerhalb jedes Blocks war randomisiert. Somit wurde jeder Versuchsperson jede Versuchsbedingung im Experiment insgesamt siebenmal dargeboten. Dabei wurde beachtet, dass pro Versuchsbedingung meist mehr als eine akustische Aufnahme zur Verfügung stand (siehe Tabelle 2). Diese Variation wurde im Experiment genutzt. Dafür wurde in einem iterativen Verfahren eine Sequenz von sieben akustischen Aufnahmen pro Versuchsbedingung erzeugt, welche mittels „Ziehen ohne Zurücklegen“ zufällig, aber so generiert wurde, dass jede für die entsprechende Bedingung verfügbare Aufnahme mindestens einmal enthalten war. Jede akustische Aufnahme aus dieser Sequenz wurde dann in genau einem der sieben Experimentalblöcke präsentiert. Die sieben Experimentalblöcke wurden auf vier Sitzungen aufgeteilt, wobei in der ersten Sitzung nur ein Block und in den restlichen Sitzungen jeweils zwei Blöcke präsentiert wurden (siehe 3.1.6).

3.1.2 Trialablauf und Aufgabe

Vor Beginn eines jeden Trials war das stehende Fahrzeug am linken Straßenende für die Versuchsperson sichtbar (siehe Abbildung 7). Durch Betätigung des oberen Knopfes auf der Controllervorderseite startete die Versuchsperson den Trial und das Fahrzeug näherte sich mit der Ausgangsgeschwindigkeit v_0 . Nach einer sicht-/hörbaren Zeit von $dur_{preacc} = 2.0$ s setzte dann – in Bedingungen mit Beschleunigung – die Beschleunigung des Fahrzeugs ein. Die sicht-/hörbare Zeit des Fahrzeuges nach Beschleunigungsbeginn betrug $dur_{postacc} = 3.0$ s. In Abbildung 6 ist beispielhaft das tatsächlich gefahrene Geschwindigkeitsprofil (grüne Linie) eines beschleunigenden E-Fahrzeugs dargestellt. In diesem Beispiel wird ersichtlich, dass das Fahrzeug zu Trialbeginn für 2.0 s eine konstante Geschwindigkeit von ca. 10 km/h fährt und anschließend für 3.0 s beschleunigt. Es wird außerdem deutlich, dass das tatsächlich gefahrene

Fahrprofil leicht von dem intendierten Fahrprofil (schwarze Linie) abwich – wenn auch nur gering (< 5 km/h; siehe Erläuterung in Kapitel 2.2).

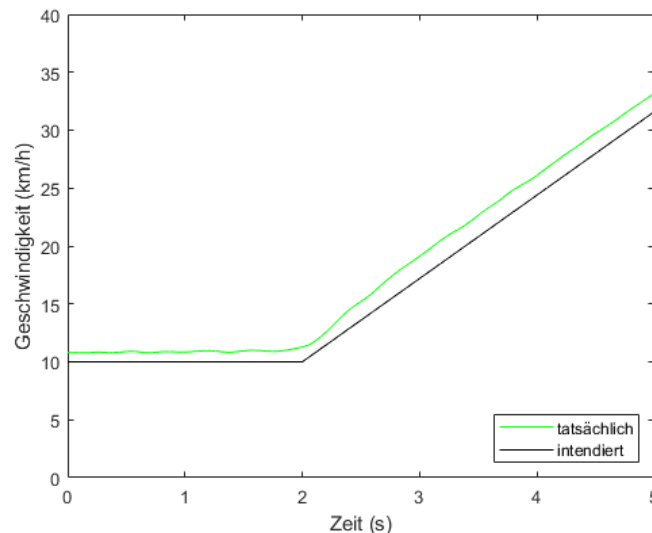


Abbildung 6: Beispiel eines Geschwindigkeitsprofils einer Beschleunigungsfahrt des E-Fahrzeugs. Die tatsächliche (grüne Linie) und die intendierte Geschwindigkeit (schwarze Linie) werden über den Zeitverlauf eines Trials dargestellt.

Für die Konstantfahrten ($a = 0$ m/s²) wurde die sicht-/hörbare Dauer auf die Summe von dur_{preacc} und $dur_{postacc}$ gesetzt. Auch hier betrug somit die Darbietungsdauer 5.0 s. Im Vorfeld konnten keine Studien identifiziert werden, die berichten, wie lange Fußgänger:innen in realen Straßenüberquerungssituationen das sich nähernde Fahrzeug beobachten, bevor sie ihre Entscheidung treffen. Somit konnten wir die sicht-/hörbare Dauer nicht auf einen solchen "ökologischen" Wert setzen. Die in diesem Experiment gewählte Präsentationsdauer liegt vermutlich über der im Alltag üblichen Entscheidungszeit beim Überqueren einer Straße. Sie stellt jedoch sicher, dass die Versuchspersonen im Experiment ausreichend Zeit hatten, die Bewegung des Fahrzeugs zu beurteilen, auch in der Beschleunigungsphase. Somit kann davon ausgegangen werden, dass im Experiment identifizierte Fehler bei der TTC-Schätzung bei kürzerer Beobachtungsdauer noch gravierender ausfallen würden.

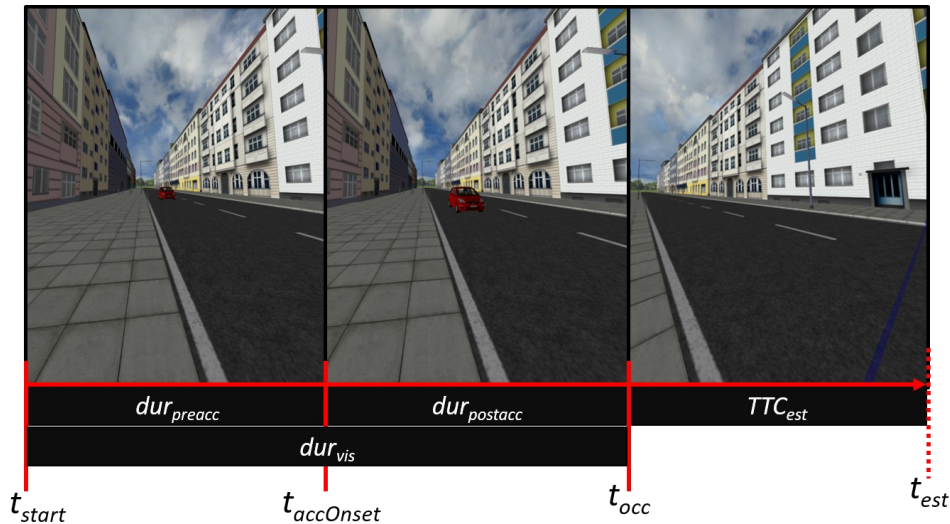


Abbildung 7: Ablauf eines Trials. Zum Zeitpunkt t_{start} startet der Trial. Nach $dur_{preacc} = 2$ s setzt bei $t_{accOnset}$ die Beschleunigung des Fahrzeuges ein. Nach $dur_{postacc} = 3$ s setzt bei t_{occ} die Okklusion ein. Die Versuchsperson schätzt nun den Zeitpunkt t_{est} , an dem das Fahrzeug an ihrer Position ankommen würde. Dabei entspricht das Zeitintervall zwischen t_{occ} und t_{est} der TTC-Schätzung TTC_{est} .

Nach der Präsentationsdauer von $dur_{vis} = 5.0$ s verschwand das Fahrzeug vom Display und war für die Versuchsperson weder sichtbar noch hörbar (siehe Abbildung 7). Die leere Straßenszene war weiterhin sichtbar und die Hintergrundgeräusche hörbar. Ihre Aufgabe war es nun, per Tastendruck (Trigger auf dem Vive Game-Controller) den Zeitpunkt anzugeben, an dem das Fahrzeug auf Höhe ihrer Position angekommen wäre, hätte es sich mit dem zuvor gezeigten Geschwindigkeitsprofil weiter fortbewegt. Die Zeitdifferenz zwischen dem Tastendruck (t_{est}) und dem Verschwinden des Fahrzeugs vom Display (Okklusionsbeginn, t_{occ}) wurde als die von der Versuchsperson geschätzte Kontaktzeit $TTC_{est} = t_{est} - t_{occ}$ gewertet.

3.1.3 Erzeugung der TTC-Bedingungen

Für jedes Geschwindigkeitsprofil (Kombination von v_0 und a), jedes Fahrzeug und jede entsprechende akustische Realaufnahme (siehe Tabelle 2) wurden drei TTC-Bedingungen (2.0 s, 3.5 s, 5.0 s) durch Verschieben der Distanz des Fahrzeugs zum Okklusionszeitpunkt in der auditiven und virtuellen Simulationssoftware erzeugt. Für die Fahrten mit konstanter Geschwindigkeit wurde hierfür die Gleichung für gleichförmige Bewegungen $r(TTC) = v_0 \cdot TTC$ verwendet, wobei $r(TTC)$ die Entfernung der Front des Fahrzeugs von der Versuchsperson auf der x-Achse des oben definierten Koordinatensystems (also parallel zum Straßenverlauf)

zum Zeitpunkt der Okklusion und für die gewünschte TTC ist. Da die aufgezeichneten Fahrprofile meist kleine Abweichungen von den intendierten Fahrprofilen aufwiesen, wurde für den Parameter v_0 der Bewegungsgleichung die durchschnittliche Geschwindigkeit v_{avg} aus den GPS-Daten der jeweiligen Aufnahme berechnet. Dabei bezog sich die Berechnung von v_{avg} auf das Zeitfenster, das der Präsentationsdauer vor Okklusionsbeginn ($dur_{vis} = 5.0$ s) entsprach.

Um die verschiedenen TTCs für die Bedingungen der Fahrten mit Beschleunigung zu erzeugen, wurde zunächst für jede Aufnahme die Geschwindigkeit bei Okklusionsbeginn (v_{occ}) aus den GPS-Daten ermittelt. Darüber hinaus wurde die durchschnittliche Beschleunigung a_{avg} innerhalb eines Zeitfensters von 1.0 s vor Okklusionsbeginn bis Okklusion ($[t_{occ} - 1.0$ s, $t_{occ}]$) berechnet. Anhand von v_{occ} und a_{avg} konnte nun die Distanz des Fahrzeuges bei Okklusion ermittelt werden, die der gewünschten TTC bei Okklusion entsprach, $r(TTC) = 0.5 \cdot (a_{avg} \cdot TTC^2 + 2 \cdot TTC \cdot v_{occ})$.

3.1.4 Vergleich der Geschwindigkeitsprofile zwischen den Fahrzeugtypen

Da die auf der Teststrecke aufgezeichneten Fahrprofile -wie oben diskutiert- durch die fahrtechnischen Herausforderungen meist leicht von den intendierten Fahrprofilen abwichen, wurden zunächst diese Abweichungen zwischen den Fahrzeugtypen verglichen, um die spätere Datenanalyse entsprechend anpassen zu können.

Bei den Konstantfahrten lagen, wie Abbildung 8 zeigt, die während der Präsentationsdauer dur_{vis} gefahrenen mittleren Geschwindigkeiten für alle drei Fahrzeugtypen nah beieinander und nah an den intendierten Geschwindigkeiten, abgesehen von einer Ausnahme (eine Aufnahme des Verbrenners bei $v = 50$ km/h). Die mittleren gefahrenen Geschwindigkeiten unterschieden sich zwischen den Fahrzeugtypen bei allen intendierten Geschwindigkeiten im Mittel um maximal 2.3 km/h.

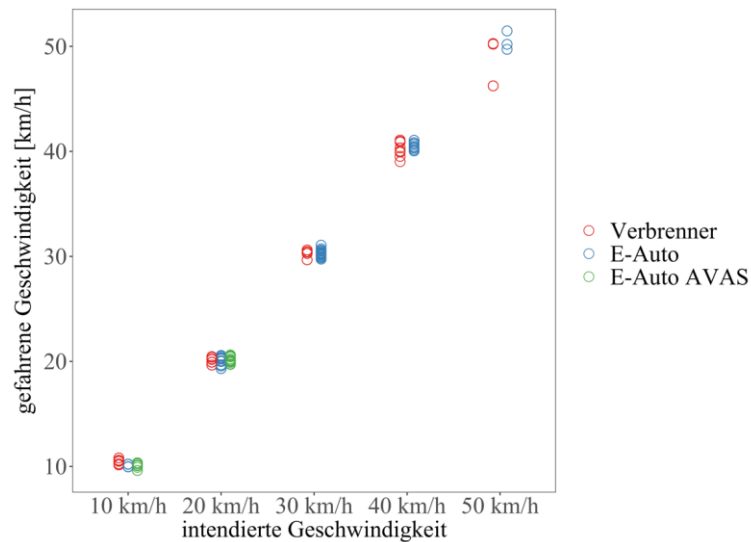


Abbildung 8: Konstantfahrten. Gefahrte konstante Geschwindigkeit (v_{avg}) als Funktion der intendierten Geschwindigkeit (v) für die drei Fahrzeugtypen (rot: Verbrenner, blau: E-Auto ohne AVAS, grün: E-Auto mit AVAS).

Für die Beschleunigungsfahrten zeigt Abbildung 9 die Geschwindigkeit bei Okklusion (v_{occ}) und die mittlere gefahrene Beschleunigung a_{avg} innerhalb des Zeitfensters von 1.0 s vor Okklusionsbeginn bis Okklusion [$t_{\text{occ}} - 1.0$ s, t_{occ}] für die drei Fahrzeugtypen. Es zeigen sich Abweichungen von der intendierten Beschleunigung und eine Variation in der Geschwindigkeit bei Okklusion. Bei einer intendierten Beschleunigung von 0.6 m/s^2 (oberes Panel in Abbildung 9) streuen die im Experiment dargebotene v_{occ} und a_{avg} jedoch für alle drei Fahrzeugtypen jeweils in einem vergleichbaren Bereich. Bei einer intendierten Beschleunigung von 2.0 m/s^2 lagen die tatsächlich gefahrenen Beschleunigungen im Zeitfenster von 1 s vor Okklusion bei höheren Endgeschwindigkeiten (entsprechend höheren Ausgangsgeschwindigkeiten v_0) für den Verbrenner tendenziell über den Beschleunigungswerten für das E-Auto. Bei niedrigen Endgeschwindigkeiten lag hingegen a_{avg} für den Verbrenner tendenziell unter den Beschleunigungswerten für die beiden E-Fahrzeugtypen.

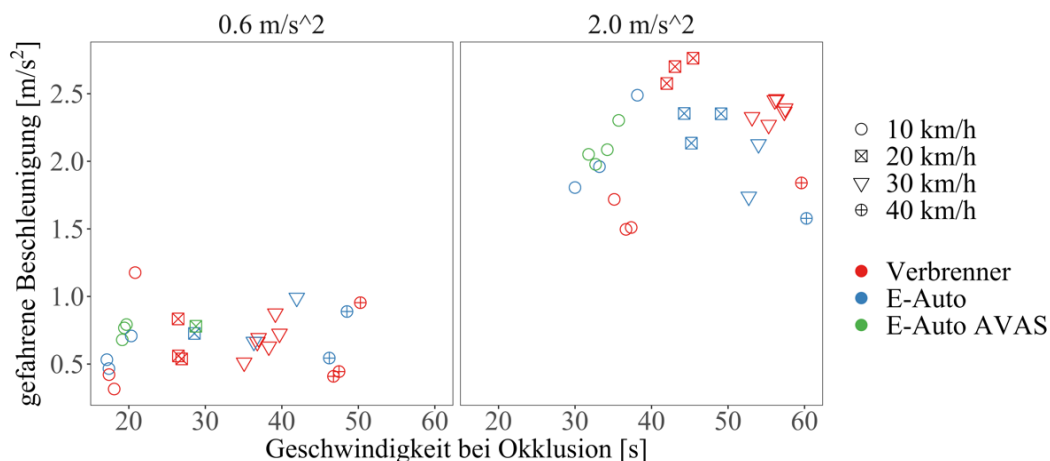


Abbildung 9: Mittlere gefahrene Beschleunigung (a_{avg}) innerhalb des Zeitfensters von 1.0 s vor Okklusionsbeginn bis Okklusion [$t_{occ} - 1.0 \text{ s}$, t_{occ}] als Funktion der Geschwindigkeit bei Okklusion (v_{occ}), für die drei Fahrzeugtypen (Farbkodierung) und die nominalen Ausgangsgeschwindigkeiten (Formkodierung). Linkes Panel: intendierte Beschleunigung $a = 0.6 \text{ m/s}^2$. Rechtes Panel: intendierte Beschleunigung $a = 2.0 \text{ m/s}^2$.

Aus fahrtechnischer Sicht können die Unterschiede zwischen Verbrenner und E-Auto bei den Beschleunigungsfahrten zum Teil mit Schaltvorgängen beim Verbrenner in Zusammenhang gebracht werden. So enthielten zwei der drei für den Verbrenner zur Verfügung stehenden Aufnahmen bei einer intendierten Ausgangsgeschwindigkeit von $v_0 = 10 \text{ km/h}$ und einer intendierten Beschleunigung von $a = 0.6 \text{ m/s}^2$ einen Schaltvorgang. Bei einer intendierten Beschleunigung von $a = 2.0 \text{ m/s}^2$ und einer intendierten Ausgangsgeschwindigkeit von $v_0 = 10 \text{ km/h}$ enthielten alle Aufnahmen des Verbrenners einen Schaltvorgang. Um der Variation der tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen Rechnung zu tragen und um eine Konfundierung des Effekts des Fahrzeugtyps durch die Unterschiede in der gefahrenen Beschleunigung zu vermeiden, wurden in der Datenanalyse für die Beschleunigungsfahrten nicht die *intendierten* Geschwindigkeiten und Beschleunigungen als unabhängige Variablen verwendet. Stattdessen wurden Regressionsanalysen verwendet, in die die *tatsächlich gefahrenen* Geschwindigkeiten und Beschleunigungen als kontinuierliche Prädiktoren eingingen. Somit konnte sichergestellt werden, dass statistische Unterschiede zwischen den Fahrzeugtypen nicht auf konfundierende Einflüsse der Variation von Geschwindigkeit und Beschleunigung zwischen den einzelnen Messfahrten zurückgeführt werden können. Das resultierende statistische Modell der Daten kann zudem für die Vorhersage von TTC Schätzungen in Kombinationen von

Ausgangsgeschwindigkeit und Beschleunigung verwendet werden, die nicht exakt in dieser Form in den Fahrzeugaufnahmen enthalten sind.

3.1.5 Stichprobe

Am Experiment nahmen 30 (korrigiert-) normalsichtige und normalhörende Versuchspersonen (25 weiblich, 5 männlich) im Alter zwischen 18 und 63 Jahren ($M = 26.37$ Jahre, $SD = 8.87$ Jahre) teil. Mittels Békésy-Audiometrie (Békésy, 1947) wurden audiometrische Hörschwellen bilateral gemessen. Dabei lagen die Hörschwellen auf beiden Ohren aller Versuchspersonen in einem Frequenzspektrum zwischen 125 Hz und 4000 Hz bei maximal 21 dB HL. Die Sehschärfe wurde mit dem Freiburger Visual Acuity Test (Bach, 1996) gemessen und lag bei allen Versuchspersonen bei mindestens 1.0. Die stereoskopische Sehfähigkeit wurde mit einer digitalen VR Version des Titmus-Tests (Bennett & Rabbetts, 1998) überprüft. Alle Versuchspersonen konnten in mindestens 6 der insgesamt 9 Trials, welche Querdisparitäten von 800, 400, 200, 140, 100, 80, 60, 50 und 40 Bogensekunden abbildeten, korrekt antworten. Eine Korrektur der Sehschärfe durch das Tragen von Kontaktlinsen war in den Vortestungen und entsprechend auch im Experiment möglich. Hingegen war das Tragen einer Brille im Experiment nicht möglich, da dies den optimalen Sitz des HMD eingeschränkte. Versuchspersonen mit einem Anfallsleiden wurden vom Experiment ausgeschlossen, da die Verwendung von elektronischen Displays das Auftreten eines Anfalls hervorrufen kann.

Die Stichprobengröße wurde so gewählt, dass im hier verwendeten Messwiederholungsdesign Unterschiede in den Verhaltensmaßen (z.B. mittlere TTC-Schätzung) zwischen jeweils zwei Bedingungen (z.B. E-Auto versus Verbrenner) bereits bei einer relativ kleinen Effektstärke in der Population, $d_z = 0.53$, (Cohen, 1988) mit einer Teststärke von 80% erkannt werden konnten ($\alpha = .05$).

Die Versuchspersonen waren nicht über die Versuchshypothesen informiert. Das Experiment wurde nach den in der Erklärung von Helsinki formulierten ethischen Prinzipien zur (medizinischen) Forschung am Menschen durchgeführt. Alle Versuchspersonen nahmen freiwillig teil und gaben ihre schriftliche Einwilligung, nachdem ihnen Studieninformationen und mögliche Risiken erläutert wurden. Ein Abbruch des Experiments war jederzeit möglich, ohne dass der Versuchsperson dadurch Nachteile entstanden wären. Die Ethikkommission des Instituts für Psychologie der Johannes Gutenberg-Universität Mainz genehmigte die Studie (2019-JGU-psychEK-S011).

3.1.6 Versuchsablauf

Das Experiment war in vier Sitzungen unterteilt. Um das Wohlbefinden der Versuchspersonen sicherzustellen, wurde nach jedem Experimentalblock die Fast Motion Sickness Scale (Keshavarz & Hecht, 2011) ausgefüllt. Hier gaben die Versuchspersonen auf einer 20-stufigen Skala ihr derzeitiges Wohlbefinden in Hinblick auf Symptome von Simulatorkrankheit an. Um einen Eindruck des initialen Wohlbefindens der Versuchspersonen zu erlangen, wurde eine FMS Baseline-Messung vor Beginn des Experiments durchgeführt. Im Anschluss daran erhielten sie Instruktionen für das bevorstehende Experiment und durchliefen einen Trainingsblock mit 31 Trials. Nachdem auftretende Rückfragen der Versuchspersonen geklärt wurden, absolvierten die Versuchspersonen den ersten von insgesamt sieben Experimentalblöcken mit jeweils 93 Trials (651 Trials im gesamten Experiment). Nach der Hälfte der Trials (nach ca. 20 Minuten) einer Sitzung wurde die Versuchsperson gebeten eine Pause zu machen. Da jeder Trial von der Versuchsperson selbst gestartet wurde, gab es zudem jederzeit die Möglichkeit weitere Pausen zu machen.

In den Sitzungen 2 bis 4 wurden jeweils zwei Experimentalblöcke der Prediction-Motion Aufgabe präsentiert. Zu Beginn jeder Sitzung gab es fünf Trainingsdurchgänge. In Sitzung 4 füllten die Versuchspersonen nach Abschluss des siebten und letzten Experimentalblocks einen Abschlussfragebogen aus. Der Fragebogen beinhaltete Fragen des Igroup Presence Questionnaires (IPQ) (Schubert, Friedmann, & Regenbrecht, 2001), der ermittelt, wie stark sich die Versuchspersonen in der simulierten virtuellen Straßenszene präsent fühlten (zum Konzept Presence siehe z.B. Witmer & Singer, 1998). Die Ergebnisse des IPQ sind im Anhang aufgeführt. Das Experiment dauerte ca. 4.5 bis 5 Stunden.

3.2 Ergebnisse und Diskussion

Die TTC-Schätzungen bei den Fahrten mit konstanter Geschwindigkeit und bei den Beschleunigungsfahrten werden im Folgenden separat analysiert und diskutiert.

3.2.1 TTC-Schätzungen bei den Konstantfahrten

Eine vorläufige Auswertung der Daten zeigte, dass eine der dargebotenen Konstantfahrten (E-Auto, 20 km/h) im dargebotenen Zeitfenster eine Beschleunigung von -0.4 m/s^2 aufwies. Trials, die diese Fahrt beinhalteten, wurden von der weiteren Analyse ausgeschlossen. Dies betraf nur 21 der insgesamt 19530 im Experiment erhobenen Trials.

Für jede Kombination von Versuchsperson, Fahrzeugtyp, v_0 , TTC und Aufnahme wurden, wenn mindestens 5 Trials der jeweiligen Kombination verfügbar waren, die erhobenen TTC-Schätzungen nach der Tukey-Methode (Tukey, 1977) auf Ausreißer untersucht. Datenpunkte, die mehr als drei Interquartilsabstände unter dem 1. bzw. über dem 3. Quartil lagen, wurden als Ausreißer ausgeschlossen. Nach diesem Vorgehen wurden 5 Trials der 7539 Konstantfahrten ausgeschlossen. Insgesamt flossen also 7534 Trials in die Datenanalyse der Konstantfahrten ein. Unterschiede in den mittleren geschätzten TTCs wurden mittels ANOVAs für Messwiederholungen (multivariater Ansatz) analysiert. Dabei bezog sich die erste Analyse auf die Konstantfahrten von Verbrenner und E-Auto bei allen Geschwindigkeiten (10 - 50 km/h). Eine zweite Analyse berücksichtigte zusätzlich das E-Auto mit AVAS (siehe nachfolgender Abschnitt 3.2.1.1). Da das E-Auto mit AVAS jedoch nur bei Geschwindigkeiten unterhalb von 28 km/h aktiv war, lagen hier nur Versuchsdaten bei 10 und 20 km/h vor.

Die mittleren TTC-Schätzungen für die Konstantfahrten aller Fahrzeugtypen sind in Abbildung 10 als Funktion der dargebotenen TTC dargestellt. Datenpunkte auf der Diagonale entsprechen einer im Mittel perfekten Kontaktzeitschätzung. Datenpunkte oberhalb der Diagonale entsprechen einer im Mittel zu langen TTC-Schätzung (Überschätzung der TTC). Die Überschätzung der TTC stellt in einer Straßenüberquerungssituation ein potenzielles Risiko dar, da die Versuchsperson annimmt, dass das Fahrzeug später an ihrer Position ankommen werde, als es tatsächlich der Fall ist. Im Gegensatz dazu stellen Datenpunkte unterhalb der Diagonalen eine Unterschätzung der TTC dar. Die Versuchsperson schätzt also, dass das Fahrzeug früher an ihrer Position ankommen würde, als es tatsächlich der Fall ist. Die Unterschätzung der TTC entspricht zwar einem Schätzfehler, birgt jedoch kein direktes Risiko in einer Straßenüberquerungssituation.

Bei allen Geschwindigkeiten lagen die mittleren TTC-Schätzungen recht nah an der tatsächlichen TTC. Dies bestätigt, dass die Simulationsqualität des VR Systems hoch war und die Versuchspersonen die Aufgabe der TTC-Schätzung gut umsetzen konnten. Nur bei der niedrigsten Geschwindigkeit zeigten die mittleren TTC-Schätzungen eine deutlichere Abweichung von der tatsächlichen TTC. Hier wurde die TTC im Mittel unterschätzt. Zudem wurde über alle Geschwindigkeiten hinweg die längste dargebotene TTC von 5.0 s im Mittel eher unterschätzt als die beiden kürzeren TTC 2.0 s und 3.5 s. Die Unterschiede zwischen den Fahrzeugtypen fielen bei den Konstantfahrten deskriptiv recht gering aus.

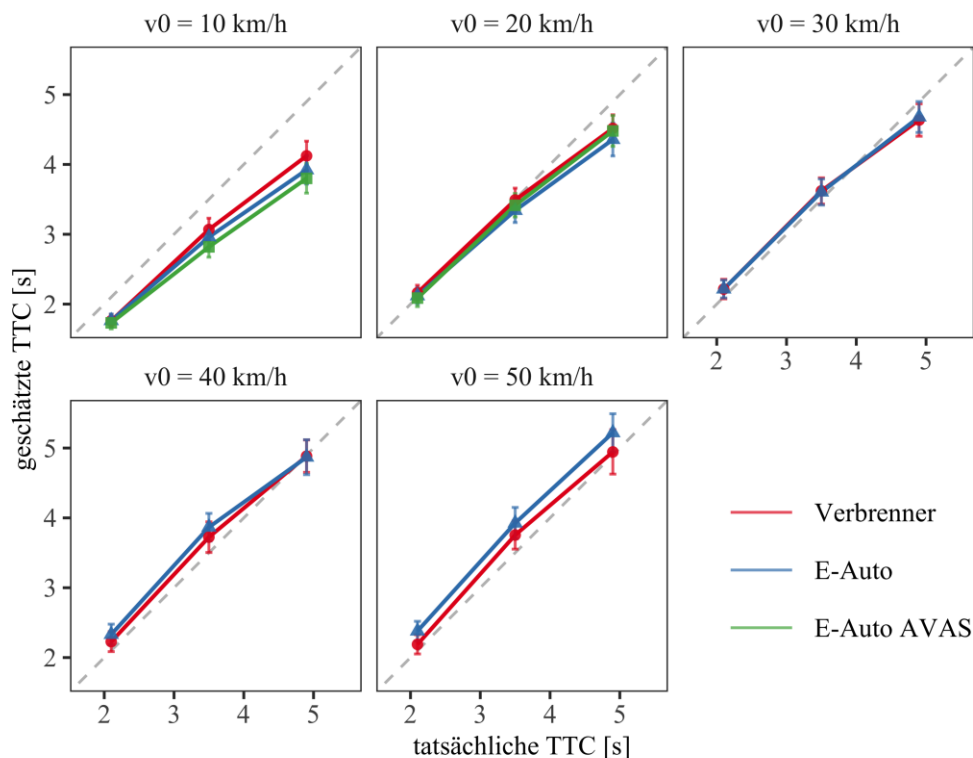


Abbildung 10: Experiment 1. Mittlere TTC-Schätzungen bei den Konstantfahrten als Funktion der tatsächlichen TTC. Jedes Panel zeigt eine nominale Geschwindigkeit. Die Diagonale entspricht einer perfekten TTC-Schätzung. Rot: Verbrenner. Blau: E-Auto ohne AVAS. Grün: E-Auto mit AVAS. Die Fehlerbalken zeigen ± 1 Standardfehler des Mittelwerts.

Die repeated-measures ANOVA (rmANOVA) zeigte keinen signifikanten Unterschied in der mittleren geschätzten TTC zwischen Verbrenner ($M = 3.42$ s, $SD = 1.48$ s) und E-Auto ($M = 3.44$ s, $SD = 1.48$ s), $F(1,29) = 0.68$, $p = .417$. Bei den Konstantfahrten spielten also die unterschiedlichen akustischen Signaturen von Verbrenner und E-Auto im Mittel keine wesentliche Rolle für die TTC-Schätzung.

Die Interaktion zwischen Geschwindigkeit und Fahrzeugtyp war jedoch signifikant, $F(4,26) = 10.29$, $p < .001$, $\eta_p^2 = 0.61$. Bei einer Geschwindigkeit von 10 km/h wurde die TTC des E-Autos im Mittel kürzer geschätzt als die TTC des Verbrenners. Bei Geschwindigkeiten ab 40 km/h kehrte sich dieser Effekt um (Abbildung 10), hier wurde also im Mittel das E-Fahrzeug als später an der Versuchsperson ankommend eingeschätzt als der Verbrenner.

Die geschätzte TTC stieg signifikant mit der tatsächlichen TTC an, $F(2,28) = 173.77$, $p < .001$, $\eta_p^2 = 0.93$. Die Versuchspersonen passten ihre TTC-Schätzung also an die tatsächlich dargebotene TTC an (Abbildung 10).

Der Haupteffekt der Geschwindigkeit war signifikant, $F(4,26) = 10.75$, $p < .001$, $\eta_p^2 = 0.62$. Im Mittel unterschätzten die Versuchspersonen die TTC bei einer Geschwindigkeit von 10 km/h, während die TTC bei den höheren Geschwindigkeiten häufig überschätzt wurde. Dies ist kompatibel mit einem Size-Arrival Effekt (DeLucia, 1991). Der Size-Arrival Effekt besagt, dass bei gleicher objektiver TTC ein Objekt, das einen großen Sehwinkel auf der Netzhaut einnimmt, so wahrgenommen wird, als komme es früher an einer definierten Position an als ein Objekt, das einen kleineren Sehwinkel einnimmt. Da sich das Fahrzeug bei 10 km/h bei gegebener TTC näher an der Versuchsperson befand als bei höheren Geschwindigkeiten, nahm es entsprechend einen größeren Sehwinkel auf der Netzhaut ein als Fahrzeuge bei höheren Geschwindigkeiten. Eine alternative Beschreibung der mit der Geschwindigkeit steigenden TTC-Schätzungen ist ein Distanzeffekt. Wenn das Fahrzeug bei Okklusion weiter entfernt war, wurde die TTC als länger geschätzt (distance bias; Law et al., 1993). Da im Experiment die Größe des simulierten Fahrzeugs konstant war, kann aufgrund unserer Daten nicht differenziert werden, zu welchen Teilen der Effekt der Geschwindigkeit auf die visuelle Größe bzw. die Distanz bei Okklusion zurückzuführen ist.

Der Effekt der tatsächlichen TTC interagiert mit der Geschwindigkeit, $F(8,22) = 2.60$, $p = .036$, $\eta_p^2 = 0.49$. Während bei den höheren Geschwindigkeiten die geschätzte TTC um fast denselben Betrag zunahm wie die tatsächliche TTC, stieg die geschätzte TTC bei 10 km/h bei einer Veränderung der tatsächlichen TTC von 3.0 s (Anstieg von 2.0 auf 5.0 s) nur um etwa 2 s an (Abbildung 10). In dieser Hinsicht war die Schätzung der TTC bei den niedrigen Geschwindigkeiten also weniger genau als bei den höheren Geschwindigkeiten.

Die Interaktion zwischen TTC und Fahrzeugtyp war nicht signifikant, $F(2,28) = 1.19$, $p = .321$. Die Interaktion $TTC \times v_0 \times$ Fahrzeugtyp war ebenfalls nicht signifikant, $F(8,22) = 0.98$, $p = .478$. Auch in der Interaktion mit TTC und Geschwindigkeit hatte also der Fahrzeugtyp keinen substantiellen Effekt.

3.2.1.1 Effekt des AVAS auf die TTC-Schätzungen bei Konstantfahrten

Bei den Konstantfahrten mit 10 und 20 km/h wurde zusätzlich zu Verbrenner und E-Fahrzeug ohne AVAS das E-Fahrzeug mit AVAS präsentiert (siehe Abbildung 10). Für die mittleren TTC-Schätzungen bei den beiden niedrigsten Geschwindigkeiten wurde deshalb eine weitere ANOVA mit Messwiederholung durchgeführt.

Hier zeigte sich ein signifikanter Haupteffekt des Fahrzeugtyps, $F(2,28) = 13.56$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .492$. Die mittleren Kontaktzeitschätzungen für das E-

Auto mit AVAS ($M = 3.06$ s, $SD = 1.31$ s) bzw. für das E-Auto ohne AVAS ($M = 3.08$ s, $SD = 1.30$ s) waren kürzer als die Schätzungen für den Verbrenner ($M = 3.19$ s, $SD = 1.32$ s). Anschließende Bonferroni-korrigierte Paarvergleiche zeigten, dass die Unterschiede in der mittleren geschätzten TTCs für den Vergleich von Verbrenner und E-Auto ohne AVAS, $t(179) = 4.40$, $p_{bonf} < .001$, $d_z = 0.80$ (Cohen, 1988), sowie für den Vergleich von Verbrenner und E-Auto mit AVAS, $t(179) = 4.68$, $p_{bonf} < .001$, $d_z = 0.85$, signifikant waren. Die mittleren geschätzten TTCs für das E-Auto mit und ohne AVAS unterschieden sich nicht signifikant, $t(179) = 0.73$, $p_{bonf} = 1.000$. Der Unterschied zwischen den TTC Schätzungen für Verbrenner versus E-Autos war also systematischer als der Unterschied zwischen dem E-Auto mit und ohne AVAS.

Der Effekt des Fahrzeugtyps wurde mit zunehmender TTC ausgeprägter; die $TTC \times$ Fahrzeugtyp Interaktion war signifikant, $F(4,26) = 5.23$, $p = .003$, $\eta^2_v = .446$. Bei einer TTC von 5.0 s zeigten sich die größten Unterschiede zwischen den TTC-Schätzungen für die drei Fahrzeugtypen. Die Versuchspersonen unterschätzten deskriptiv die TTC mit steigender tatsächlicher TTC für das E-Auto mit AVAS am stärksten, wobei auch die TTC für das E-Auto ohne AVAS deskriptiv stärker unterschätzt wurde als der Verbrenner. Der Fahrzeugeffekt unterschied sich außerdem signifikant zwischen den beiden Geschwindigkeitsstufen, $F(2,28) = 6.60$, $p = .004$, $\eta^2_v = .320$. Dabei war der Unterschied zwischen den geschätzten TTCs der drei Fahrzeugtypen, wie auch in Abbildung 10 zu erkennen, bei 10 km/h deutlicher als bei 20 km/h.

Die geschätzte TTC stieg mit zunehmender tatsächlicher TTC an, $F(2,28) = 148.63$, $p < .001$, $\eta^2_v = .914$. Die Versuchspersonen passten ihre TTC-Schätzungen also der tatsächlich dargebotenen TTC an (Abbildung 10). Die mittleren TTC-Schätzungen nahmen von 10 auf 20 km/h zu, $F(1,29) = 62.62$, $p < .001$, $\eta^2_v = .683$. Dies ist wieder kompatibel mit einem Size-Arrival Effekt (DeLucia, 1991). Die Interaktion zwischen Geschwindigkeit und tatsächlicher TTC war nicht signifikant, $F(2,28) = 3.03$, $p = .064$. Die dreifach Interaktion zwischen Fahrzeugtyp, TTC und Geschwindigkeit war ebenfalls nicht signifikant, $F(4,26) = 2.20$, $p = .097$.

Insgesamt zeigte sich bei den meisten Geschwindigkeiten kein substanzieller Effekt des Fahrzeugtyps. Selbst bei der niedrigsten Geschwindigkeit, bei der es einen signifikanten Effekt des Fahrzeugtyps gab, waren die Unterschiede in den mittleren TTC-Schätzungen für Verbrenner bzw. E-Autos eher gering. Das AVAS hatte keinen deutlichen Effekt auf die TTC-Schätzungen. Dieses Muster ist kompatibel mit früheren Studien, die für sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegende Objekte keine substanziellen Unterschiede zwischen den mittleren TTC-Schätzungen in einer rein visuellen Bedingung (ohne akustische

Information) und einer audio-visuellen Bedingung (mit zusätzlicher akustischer Information) fanden (DeLucia, et al., 2016; Keshavarz, et al., 2017; Zhou et al., 2007).

3.2.2 TTC-Schätzungen bei den Beschleunigungsfahrten

Wie bei den Konstantfahrten werden zunächst die TTC Schätzungen für Verbrenner und E-Auto ohne AVAS analysiert, da diese beiden Fahrzeugtypen in einer größeren Bandbreite von Kombinationen aus Ausgangsgeschwindigkeit und Beschleunigung dargeboten wurden. Anschließend werden noch einmal separat die TTC-Schätzungen bei den beiden niedrigsten Ausgangsgeschwindigkeiten analysiert, dort wurde zusätzlich das E-Auto mit AVAS dargeboten. Für die grafische Darstellung der beobachteten TTC-Schätzungen wurden von Ausreißern bereinigte Daten verwendet. Dabei folgte die Ausreißerkorrektur jener, welche auch für die Konstantfahrten angewandt wurde. In der statistischen Analyse der TTC-Schätzungen für die Beschleunigungsfahrten wurde anhand von Regressionsdiagnostik eine andere, für die dort verwendeten Regressionsmodelle adäquatere Ausreißerkorrektur vorgenommen, die weiter unten näher beschrieben wird.

3.2.2.1 Verbrenner versus E-Auto ohne AVAS

Abbildung 11 zeigt die mittleren TTC-Schätzungen als Funktion der tatsächlich gefahrenen Beschleunigung. Die meisten mittleren TTC-Schätzungen lagen über dem tatsächlichen TTC-Wert, der jeweils durch die horizontale gestrichelte Linie in den Panels von Abbildung 11 dargestellt wird. Wie auf Basis der Literatur erwartet, wurden also die TTCs bei den Beschleunigungsfahrten systematisch überschätzt. Eine solche Überschätzung der TTC stellt in einer Straßenüberquerungssituation ein potenzielles Risiko dar, da die Versuchsperson annimmt, dass das Fahrzeug später an ihrer Position ankommen würde, als es tatsächlich der Fall wäre. Die Überschätzung der TTC stieg im Mittel mit zunehmender Beschleunigung (x -Achse in Abbildung 11) und mit zunehmender tatsächlicher TTC (Zeilen in Abbildung 11) an. Dieser Befund entspricht qualitativ einer Schätzung erster Ordnung (first-order Schätzung), in der die Versuchspersonen die Beschleunigung des Fahrzeugs zwischen dem Moment der Okklusion und dem Eintreffen an ihrer Position nicht bzw. nicht vollständig berücksichtigen, sondern so schätzen, als würde das Fahrzeug zwischen der Okklusion und dem Eintreffen an ihrer Position konstant mit der zum Okklusionszeitpunkt erreichten Geschwindigkeit weiterfahren (z.B. Benguigui, et al., 2003). Würden die Versuchspersonen die Beschleunigung adäquat in ihrer Schätzung berücksichtigen, so würde die

geschätzte TTC nicht in Abhängigkeit von der Beschleunigung steigen. Wenn die Beschleunigung hingegen überhaupt nicht oder nur unzureichend berücksichtigt wird, folgt daraus eine zunehmende Überschätzung der TTC mit zunehmender Beschleunigung. Diese Überschätzung würde bei längerer dargebotener TTC stärker ausfallen, da das beschleunigende Fahrzeug hier im Zeitraum zwischen Okklusion und Eintreffen bei der Beobachter:in stärker an Geschwindigkeit gewinnen würde als bei einer kurzen TTC.

Über die Ausgangsgeschwindigkeiten, Beschleunigungen und TTCs hinweg war die Überschätzung der TTC im Mittel für die E-Fahrzeuge (mit und ohne AVAS; blaue bzw. grüne Symbole in Abbildung 11) stärker ausgeprägt als für den Verbrenner (rote Symbole in Abbildung 11). In Abbildung 11 liegen, bis auf eine einzige Ausnahme, auf jeder Beschleunigungsstufe die Datenpunkte für die E-Fahrzeuge über den Datenpunkten für den Verbrenner. Die Überschätzung der TTC stieg zudem für die E-Autos stärker mit der Beschleunigung und der TTC an als für den Verbrenner. Dieses Muster ist kompatibel mit unserer Hypothese, dass durch die geänderte akustische Signatur der E-Fahrzeuge ihre Beschleunigung weniger gut erkannt bzw. weniger gut bei der TTC-Schätzung berücksichtigt werden kann (first-order Schätzung). Wie bereits beschrieben, würde man bei einer first-order Schätzung erwarten, dass der Effekt mit steigender TTC deutlicher wird. Dieses Muster bestätigte sich für die beiden E-Autos, da der Schätzfehler mit der dargebotenen TTC zunahm. Dadurch war bei der längsten TTC von 5.0 s (dritte Spalte in Abbildung 11) der Unterschied zwischen den TTC-Schätzungen der drei Fahrzeugtypen am deutlichsten. Mit zunehmender Beschleunigung stiegen die mittleren TTC-Schätzungen zwar für alle Fahrzeugtypen an, allerdings wurde die TTC für den Verbrenner bei niedriger Beschleunigung unterschätzt und bei hoher Beschleunigung nur um ungefähr 1 s (bei $v_0 = 40$ km/h) überschätzt. Dahingegen wurde die TTC-Schätzung für das E-Auto ohne AVAS im Mittel schon niedriger Beschleunigung um ungefähr 0.5 s überschätzt. Die Überschätzung der TTC für das E-Auto ohne AVAS stieg bis auf über 2.0 s bei der höchsten Beschleunigung an. Die TTC für das E-Auto mit AVAS wurde zwar auch deutlicher überschätzt als für den Verbrenner, allerdings nicht so sehr wie für das E-Auto ohne AVAS. Dieser Effekt legt nahe, dass die Beschleunigung des Verbrenners zwar nicht perfekt in der TTC-Schätzung berücksichtigt wurde, allerdings von allen Fahrzeugtypen noch am besten. Es ist jedoch zu betonen, dass der Schätzfehler für den Verbrenner, der überwiegend einer Unterschätzung der TTC entsprach, kein potenzielles Risiko für gefährliche Straßenüberquerungsentscheidungen implizieren würde – die Überschätzung der TTC für die beiden E-Autos hingegen schon. Auch

wenn das AVAS offenbar Informationen über die Beschleunigung des E-Autos lieferte, so wurden diese nur bedingt bei der TTC-Schätzung berücksichtigt.

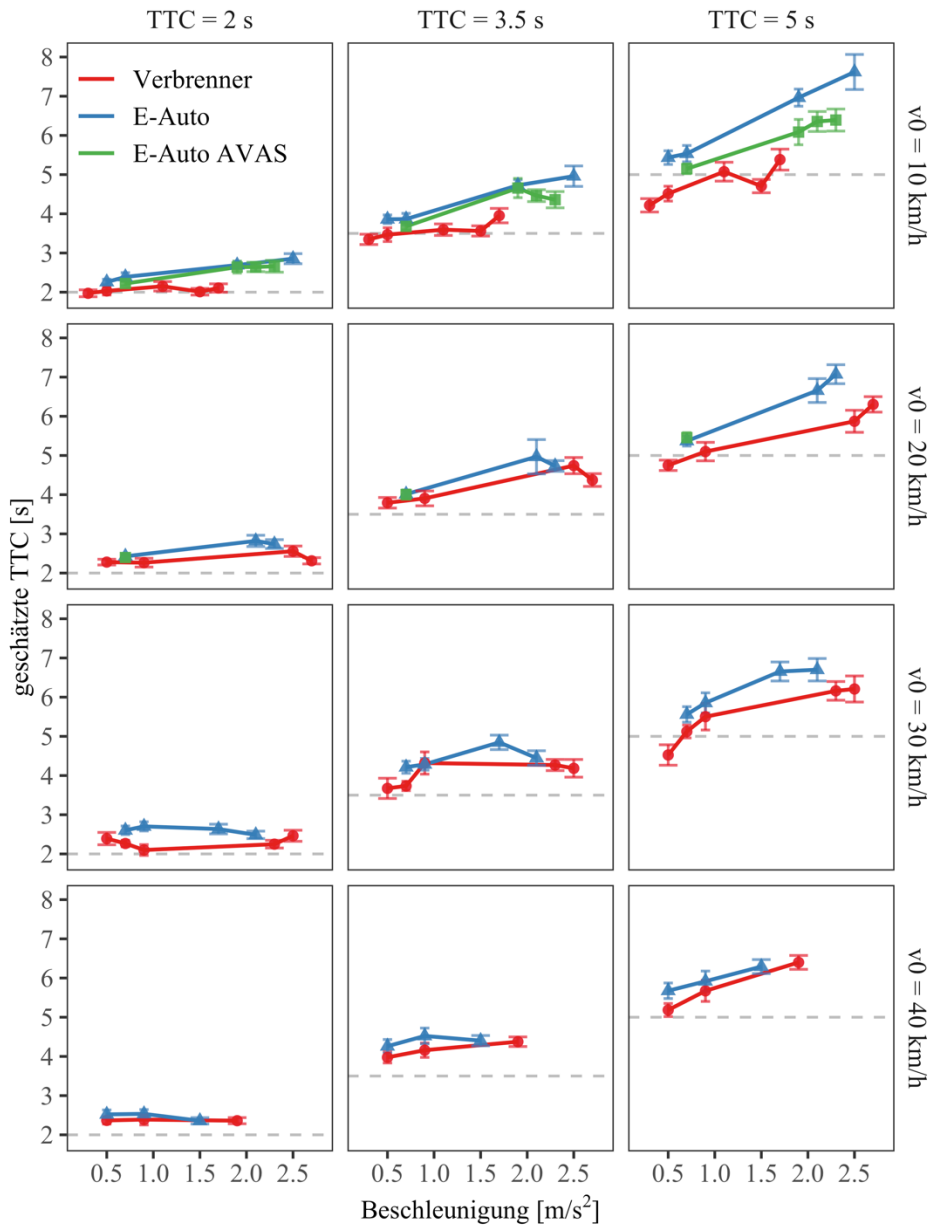


Abbildung 11: Mittlere TTC-Schätzungen bei den Beschleunigungsfahrten in Experiment 1 als Funktion der Beschleunigung a_{avg} . Jede Zeile zeigt eine Ausgangsgeschwindigkeit (v_0), jede Spalte zeigt eine dargebotene TTC. Rot: Verbrenner. Blau: E-Auto ohne AVAS. Grün: E-Auto mit AVAS. Die Fehlerbalken zeigen ± 1 Standardfehler des Mittelwerts. Die graue gestrichelte Linie repräsentiert eine perfekte Schätzung der TTC. Binweite 0.2 m/s².

Mit zunehmender Ausgangsgeschwindigkeit wurde der Unterschied zwischen den TTC-Schätzungen für Verbrenner und E-Auto ohne AVAS insgesamt geringer. Die TTC-Schätzungen für das E-Fahrzeug mit aktiviertem AVAS (bis 28 km/h aktiv) lagen generell zwischen den Schätzungen für Verbrenner und E-Auto ohne AVAS. Das AVAS verbesserte die TTC-Schätzung für das E-Fahrzeug also etwas, die Schätzungen lagen aber immer noch näher an den Schätzungen für das E-Auto ohne AVAS als an den akkurateren Schätzungen für den Verbrenner. Da wie in Abschnitt 3.1.4 beschrieben die gefahrenen Beschleunigungen teilweise von den intendierten Beschleunigungen abwichen, wurden die tatsächlich gefahrenen Beschleunigungen und Geschwindigkeiten bei Okklusion bei der Analyse der Beschleunigungsfahrten statistisch berücksichtigt. In einem linearen gemischten Regressionsmodell (linear mixed-effects model; LMM) mit random intercept gingen die tatsächlich gefahrene Beschleunigung und die tatsächlich gefahrene Geschwindigkeit bei Okklusion als kontinuierliche Prädiktoren ein.

Im hier untersuchten Kontext ist vor allem relevant, aus den im Experiment erhobenen Daten Vorhersagen für andere, zukünftige Verkehrssituationen treffen zu können. In Bezug auf die bei statistischen Analysen unvermeidliche Abwägung zwischen Verzerrungsfreiheit und Varianz (bias-variance tradeoff; s. z.B. James, Witten, Hastie, and Tibshirani (2013)) war es also wichtiger, ein robustes statistisches Modell zu formulieren, für das ein geringer Vorhersagefehler für zukünftige Datensätze erwartet werden kann, als ein Modell anzupassen, das die vorliegenden Daten möglichst präzise abbildet (Yarkoni & Westfall, 2017). Für die Auswahl der in das Regressionsmodell eingehenden Variablen wurde deshalb ein Kreuzvalidierungsansatz gewählt.

Die 10-fache Kreuzvalidierung ist ein Verfahren, bei dem der Datensatz zunächst zufällig in 10 Teile aufgeteilt wird. Jeweils 9 der 10 Teile bilden das Trainingsset, an das das statistische Modell angepasst wird. Der verbleibende 10. Teil bildet das Testset. Das an den Trainingsdatensatz angepasste Regressionsmodell wird auf das Testset angewendet. Für jeden Datenpunkt im Testset wird der Vorhersagefehler als Abweichung des vorhergesagten vom beobachteten Wert (geschätzte TTC) verzeichnet. Somit wird die Vorhersagegenauigkeit des Modells für Daten getestet, die nicht in die Schätzung der Modellparameter eingingen. Diese Prozedur wird für jede der 10 möglichen Aufteilungen in Trainings- und Testset durchgeführt. Um die statistische Robustheit weiter zu erhöhen, wurde für jedes mögliche Regressionsmodell die Kreuzvalidierung zwei Mal durchgeführt. Die Summe der quadrierten Vorhersagefehler (predicted residual sum of squares; PRESS) wurde als Gütemaß bei der Modellauswahl herangezogen.

In der statistischen Analyse für die Beschleunigungsfahrten von Verbrenner und E-Auto ohne AVAS wurden zunächst alle möglichen Kombinationen der Haupteffekte und Interaktionseffekte in die Modellauswahl per Kreuzvalidierung einbezogen. Die Haupteffekte waren der *Fahrzeugtyp*, die *tatsächliche TTC*, die tatsächlich zum Okklusionszeitpunkt erreichte Geschwindigkeit v_{occ} und die tatsächlich gefahrene mittlere Beschleunigung a_{avg} im Zeitfenster von 1.0 s vor Okklusionsbeginn bis Okklusion [$t_{occ} - 1.0$ s, t_{occ}]. Für jede der 32767 möglichen Kombinationen von Haupteffekten und Interaktionseffekten wurde in der Kreuzvalidierung die PRESS eines linear mixed-effect models mit random Intercept ermittelt (R Funktion *lmer()*). Von diesen Modellen zeigten 16 Modelle den niedrigsten, identischen Vorhersagefehler (PRESS = 1805.20). Es wurde jenes Modell aus den 16 Modellen gewählt, das am sparsamsten war, d.h. die Daten der Beschleunigungsfahrten mit wenigen Prädiktoren am besten beschreiben konnte. Die Modellgleichung des ausgewählten Modells lautete:

$$TTC_{est} \sim TTC + TTC \times v_{occ} + Fahrzeugtyp \times v_{occ} + Fahrzeugtyp \times TTC \times a_{avg} + Fahrzeugtyp \times a_{avg} \times v_{occ} + Fahrzeugtyp \times TTC \times a_{avg} \times v_{occ}$$

Das ausgewählte Regressionsmodell wurde mittels der R-Funktion *lmer()* an alle Daten für die Beschleunigungsfahrten (ohne E-Auto mit AVAS) angepasst. Die Varianzkomponenten wurden anhand der Methode der beschränkten maximalen Wahrscheinlichkeit (restricted maximum likelihood; REML) geschätzt. Für die statischen Tests wurde die Kenward-Roger Approximation der Freiheitsgrade verwendet (Kenward & Roger, 1997). Trials, bei denen der Absolutwert des extern studentisierten Residuums größer als 4.0 war bzw. bei denen der Index DFFITS (Belsley, Kuh, & Welsch, 1980) mehr als 5 Interquartilsabstände unterhalb des 1. oder oberhalb des 3. Quartils lag, wurden als Ausreißer bzw. einflussreiche Datenpunkte kategorisiert und von der Analyse ausgeschlossen. Insgesamt gingen 9963 Trials in die Analyse der Beschleunigungsfahrten von Verbrenner und E-Auto ein. Das Modell erklärte mit seinen random und fixed effects 71.20% der Varianz der Daten. Die Varianzaufklärung durch die fixed effects betrug $R^2_{marginal} = 0.43$ (Nakagawa & Schielzeth, 2013).

Die geschätzten *fixed effects* Parameter des Modells für Verbrenner und E-Auto ohne AVAS können Tabelle 3 entnommen werden. Besonders relevant sind hier die Interaktionseffekte zwischen Beschleunigung, Fahrzeugtyp und Geschwindigkeit bei Okklusion. Wie Tabelle 3 zeigt, stieg die geschätzte TTC für das E-Auto stärker mit dem Produkt aus TTC und Beschleunigung an, $\beta = 0.3074$, als für den Verbrenner, $\beta = 0.0413$ (Interaktion Fahrzeugtyp \times TTC \times a_{avg}). Für beide Fahrzeugtypen stieg zwar

die geschätzte TTC weniger stark mit der Beschleunigung an, wenn die Geschwindigkeit bei Okklusion hoch war. Der Effekt der Beschleunigung bei höheren Okklusionsgeschwindigkeiten war für den Verbrenner noch etwas geringer als für das E-Fahrzeug (Interaktion Fahrzeugtyp \times $a_{avg} \times v_{occ}$). Diese Abnahme des Effekts der Beschleunigung mit zunehmender Geschwindigkeit bei Okklusion war für das E-Auto ausgeprägter als für den Verbrenner. Da eine hohe Geschwindigkeit bei Okklusion vor allem bei hohen Ausgangsgeschwindigkeiten auftrat, bildet dies das in Abbildung 11 ersichtliche Muster ab, dass der Unterschied zwischen den TTC-Schätzungen für Verbrenner und E-Auto bei der höchsten Ausgangsgeschwindigkeit am geringsten war. Diese Interaktionen sind kompatibel mit der Hypothese, dass die Beschleunigung des E-Autos weniger gut bei der TTC-Schätzung berücksichtigt wurde als die des Verbrenners, insbesondere im niedrigeren Geschwindigkeitsbereich.

Tabelle 3: Geschätzte fixed effects Parameter des Modells für die Beschleunigungsfahrten (ohne E-Auto mit AVAS). Dargestellt sind Effektschätzer (β), Standardfehler (SE), Freiheitsgrade (df), t- und p-Werte.

	β	SE	df	t	p
(Intercept)	0.4921	0.2344	58	2.13	.037
TTC	0.7223	0.0379	9933	19.07	< .001
Verbrenner \times v_{occ}	0.0026	0.0041	9933	0.62	.535
E-Auto \times v_{occ}	0.0067	0.0041	9933	1.62	.105
TTC \times v_{occ}	0.0036	0.0012	9933	2.99	.003
Verbrenner \times TTC \times a_{avg}	0.0413	0.0208	9933	1.99	.047
E-Auto \times TTC \times a_{avg}	0.3074	0.0218	9933	14.12	< .001
Verbrenner \times $v_{occ} \times a_{avg}$	-0.0055	0.0013	9933	-4.23	< .001
E-Auto \times $v_{occ} \times a_{avg}$	-0.0077	0.0015	9933	-5.19	< .001
Verbrenner \times TTC \times $v_{occ} \times a_{avg}$	0.0017	0.0006	9933	3.07	.002
E-Auto \times TTC \times $v_{occ} \times a_{avg}$	-0.0024	0.0006	9933	-3.88	< .001

Das hinsichtlich eines geringen Vorhersagefehlers ausgewählte Regressionsmodell kann nun verwendet werden, um den Effekt von Beschleunigung, Fahrzeugtyp, tatsächlicher TTC und Geschwindigkeit bei Okklusion auf die TTC-Schätzungen vorherzusagen. Diese Modellvorhersage stellt das zu erwartende Muster dar, sozusagen bereinigt um das "Rauschen" in den im Experiment erhobenen Daten. Außerdem können Vorhersagen für Kombinationen aus Beschleunigung und v_{occ} getroffen werden, die über die im Experiment präsentierten Kombinationen hinausgehen. In Abbildung 12 sind die vorhergesagten TTC-Schätzungen für Beschleunigungsfahrten in Abhängigkeit von der Beschleunigung (x-Achse), den Fahrzeugtypen (farbliche Kodierung), der Geschwindigkeit bei

Okklusion (Spalten) und der tatsächlichen TTC (Zeilen) dargestellt. Die graue, gestrichelte Linie repräsentiert eine im Mittel perfekte TTC-Schätzung. Die gelbe, gestrichelte Linie repräsentiert eine first-order TTC-Schätzung, bei der die Geschwindigkeit bei Okklusion als Grundlage der TTC-Schätzung dient (Benguigui, et al., 2003) und die Beschleunigung nicht berücksichtigt wird. Die first-order TTC-Schätzung ist definiert als $TTC_{1stOrder} = D_{occ} / v_{occ} = TTC + (a_{avg} \cdot TTC^2) / (2 \cdot v_{occ})$, wobei D_{occ} die Distanz zwischen Fahrzeug und Versuchsperson zum Okklusionszeitpunkt bezeichnet und TTC die tatsächliche Kontaktzeit unter Berücksichtigung der Beschleunigung (second-order TTC). Aus der Formel und Abbildung 12 ist ersichtlich, dass die Überschätzung der tatsächlichen Kontaktzeit durch die first-order TTC mit der Beschleunigung und der tatsächlichen Kontaktzeit steigt und mit der Okklusionsgeschwindigkeit sinkt. Die mittleren TTC-Schätzungen in Abbildung 11 zeigen ein entsprechendes Muster, insbesondere für die E-Fahrzeuge. Das vom Modell vorhergesagte Muster der TTC-Schätzungen ist natürlich ähnlich dem Muster der empirisch erhobenen TTC-Schätzungen, auf denen das Modell basiert (Abbildung 11). Die vorhergesagten TTC-Schätzungen zeigen, dass mit zunehmender Beschleunigung eine zunehmende Überschätzung der TTC zu erwarten ist. Dieser Effekt der Beschleunigung ist bei höheren dargebotenen TTCs deutlich ausgeprägter, kompatibel mit einer first-order Schätzung der TTC, wie sie in der Literatur gefunden wurde. Der neue und wichtige Befund in den vorliegenden Daten ist, dass der Effekt der Beschleunigung für ein E-Auto deutlich stärker zu erwarten ist als für einen Verbrenner. Beim Verbrenner steigen selbst bei der längsten TTC von 5.0 s und den beiden niedrigsten Geschwindigkeiten bei Okklusion die vorhergesagten geschätzten TTCs zwar mit der Beschleunigung leicht an, liegen aber stets recht nahe an der tatsächlichen TTC. Für das E-Auto sagt das Modell hingegen in diesen Bedingungen einen starken linearen Anstieg der geschätzten TTC mit der Beschleunigung vorher, was in einer Überschätzung der TTC um mehr als eine Sekunde bei einer Beschleunigung von 2.0 m/s^2 resultiert. Eine so deutliche Überschätzung könnte in einer realen Straßenumgebung zu einer riskanten Überquerungsentscheidung führen. Das Muster ist kompatibel mit unserer Hypothese, dass durch die geänderte akustische Signatur der E-Fahrzeuge ihre Beschleunigung weniger gut erkannt bzw. bei der TTC-Schätzung berücksichtigt werden kann.

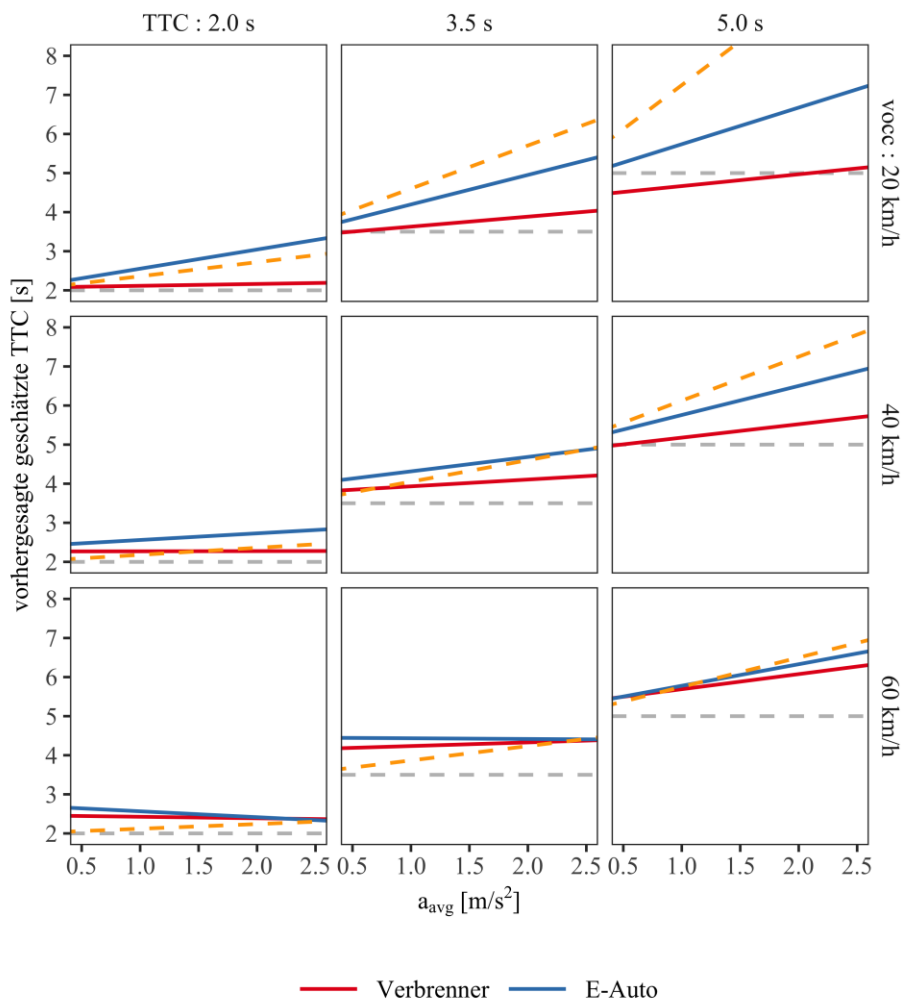


Abbildung 12: Experiment 1. Vom per Kreuzvalidierung ausgewählten Regressionsmodell für Verbrenner und E-Auto ohne AVAS vorhergesagte TTC-Schätzungen für die Beschleunigungsfahrten als Funktion der gefahrenen Beschleunigung (x-Achse), der Fahrzeugtypen (farbliche Kodierung), der Geschwindigkeit bei Okklusion (Zeilen) und der tatsächlichen TTC (Spalten). Die graue, gestrichelte Linie repräsentiert die tatsächliche TTC. Die gelbe, gestrichelte Linie repräsentiert eine first-order TTC-Schätzung. Rot: Verbrenner. Blau: E-Auto ohne AVAS.

Bei einer hohen v_{occ} gleichen sich die vorhergesagten TTC-Schätzungen für das E-Auto denen für den Verbrenner an und der Einfluss der Beschleunigung auf die TTC-Schätzungen für das E-Auto ist deutlich reduziert. Eine naheliegende Erklärung für diesen Befund ist, dass mit zunehmender v_{occ} die Differenz zwischen der first-order TTC-Schätzung (gelbe Linien in Abbildung 12) und der tatsächlichen TTC abnimmt. Somit reduziert sich der Fehler in der TTC-Schätzung, der durch eine Nicht-Berücksichtigung der Beschleunigung des E-Autos bei einer first-order

Schätzung ergeben würde. Auch bei der höchsten Geschwindigkeit bei Okklusion (rechte Spalte in Abbildung 12) sagt das Modell jedoch vorher, dass die TTC-Schätzungen für den Verbrenner näher an der tatsächlichen TTC liegen als für das E-Auto.

Zusammenfassend ist herauszustellen, dass für den beschleunigenden Verbrenner bei fast allen Fahrbedingungen eine weniger ausgeprägte Überschätzung der TTC vorhergesagt wird als für das beschleunigende E-Auto ohne AVAS. Die Versuchspersonen schätzten die Kontaktzeit von beschleunigenden E-Autos teilweise als deutlich länger ein, als sie in Wirklichkeit war, wodurch potenziell riskante Situationen im Realverkehr entstehen. Die vorhergesagte Überschätzung der TTC tritt vor allem beim stark beschleunigenden E-Auto im niedrigen Geschwindigkeitsbereich und bei einer langen tatsächlichen TTC auf. Aber auch über die Beschleunigungen, Geschwindigkeiten und TTCs hinweg ist die vorhergesagte Überschätzung der TTC im Mittel für das E-Auto stärker ausgeprägt als für den Verbrenner. In Abbildung 12 liegen mit Ausnahme der höchsten v_{occ} auf jeder Beschleunigungsstufe die vorhergesagten TTC-Schätzungen für die E-Autos über den vorhergesagten TTC-Schätzungen für die Verbrenner.

3.2.2.2 Effekt des AVAS auf TTC-Schätzungen bei Beschleunigungsfahrten

Bei 10 km/h wurden im Experiment alle drei Fahrzeugtypen (Verbrenner, E-Auto ohne AVAS, E-Auto mit AVAS) sowohl bei einer Beschleunigung von 0.6 m/s^2 als auch von 2.0 m/s^2 präsentiert. Das AVAS war im Kia eNiro bis zu einer Geschwindigkeit von 28 km/h aktiv.

Um die in Abbildung 11 ersichtliche Variation der gefahrenen Beschleunigungen zwischen den Fahrzeugtypen zu berücksichtigen, wurde derselbe Analyseansatz wie in der vorherigen Analyse verwendet. Das robusteste Regressionsmodell wurde wieder per Kreuzvalidierung ausgewählt, wie oben beschrieben. Dabei wiesen vier Modelle den niedrigsten, identischen Vorhersagefehler (PRESS = 611.93) auf, von denen das sparsamste Modell zur Analyse der Beschleunigungsfahrten inklusive E-Auto mit AVAS bei $v_0 = 10 \text{ km/h}$ ausgewählt wurde. Die Modellgleichung lautete:

$$TTC_{est} \sim TTC + \text{Fahrzeugtyp} \times a_{avg} + TTC \times a_{avg} + \text{Fahrzeugtyp} \times TTC \times v_{occ}$$

Mittels Regressionsdiagnostik wurden Ausreißer bzw. einflussreiche Datenpunkten von der Analyse ausgeschlossen (0.66 % der 3780 Trials).

Insgesamt gingen 3755 Trials in die Analyse ein. Das Modell erklärte mit seinen random und fixed effects 69.81 % der Varianz der Daten. Die Varianzaufklärung durch die fixed effects betrug $R^2_{\text{marginal}} = 0.47$. Die geschätzten *fixed effects* Parameter des Modells können Tabelle 4 entnommen werden.

Tabelle 4: Experiment 1. Geschätzte fixed effects Parameter des Modells für die Beschleunigungsfahrten bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von 10 km/h. Dargestellt sind die geschätzten Parameter (β), Standardfehler (SE), Freiheitsgrade (df), t- und p-Werte.

	β	SE	df	t	p
(Intercept)	0.3608	0.2173	60.2	1.68	.098
TTC	0.8729	0.0419	3725	20.87	< .001
TTC × a_{avg}	0.1914	0.0349	3725	5.48	< .001
Verbrenner × a_{avg}	-0.0312	0.1076	3725	-0.29	.771
E-Auto × a_{avg}	-0.1907	0.0881	3725	-2.17	.030
E-Auto AVAS × a_{avg}	-0.0311	0.0881	3725	-0.35	.724
Verbrenner × TTC × v_{occ}	-0.0071	0.0021	3725	-3.43	<.001
E-Auto × TTC × v_{occ}	0.0029	0.0026	3725	1.12	.262
E-Auto AVAS × TTC × v_{occ}	-0.0027	0.0027	3725	-1.03	.304

In Abbildung 13 sind die vom Regressionsmodell vorhergesagten TTC-Schätzungen für die Beschleunigungsfahrten mit einer Ausgangsgeschwindigkeit von 10 km/h als Funktion der Beschleunigung (x-Achse), der Fahrzeugtypen (farbliche Kodierung) und der tatsächlichen TTC (Spalten) dargestellt. Für die Vorhersage wurde die mittlere im Experiment erreichte Geschwindigkeit bei Okklusion (bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von 10 km/h) von 26.69 km/h angenommen. Die vorhergesagten TTC-Schätzungen zeigen, dass bei zunehmender Beschleunigung und tatsächlicher TTC eine zunehmende Überschätzung der TTC zu erwarten ist. Diese Effekte sind kompatibel mit einer first-order Schätzung, bei der die Beschleunigung in der TTC-Schätzung (größtenteils) unberücksichtigt bleibt. Von besonderer Bedeutung ist, dass der Effekt der Beschleunigung auf die Überschätzung der TTC für ein E-Auto mit und ohne AVAS deutlich stärker zu erwarten ist als für einen Verbrenner. Das Modell sagt vorher, dass die TTC des E-Autos sowohl mit als auch ohne AVAS bei hoher Beschleunigung deutlich überschätzt wird, wobei dieser Effekt mit zunehmender TTC stärker wird. Das AVAS (grüne Linien in Abbildung 13) reduziert laut Modell diesen Effekt etwas, ohne jedoch das Niveau der TTC-Schätzungen für den Verbrenner zu erreichen. Beim E-Auto ohne AVAS beläuft sich die vorhergesagte Überschätzung der TTC bei einer Beschleunigung von 2.0 m/s² und einer tatsächlichen TTC

von 5.0 s auf ungefähr 1.5 s, mit AVAS reduziert sich die Überschätzung der TTC für das E-Auto auf ca. 1.0 s. Im Vergleich dazu liegt die vorhergesagte TTC für den Verbrenner unter diesen Bedingungen im Mittel nahe an einer perfekten Schätzung. Die vorhergesagte Überschätzung der TTC für das stark beschleunigende E-Auto mit und ohne AVAS könnte somit in einer realen Straßenumgebung zu einer riskanten Überquerungsentscheidung führen.

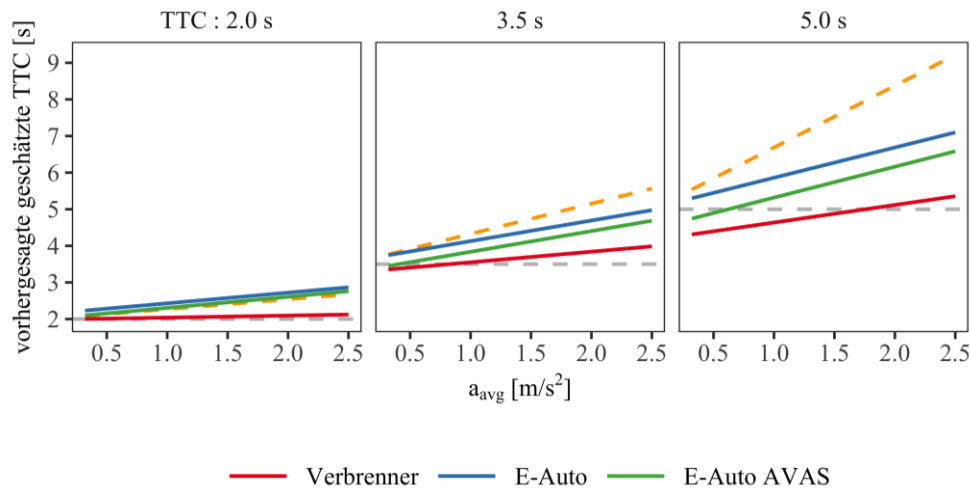


Abbildung 13: Experiment 1. Vom per Kreuzvalidierung ausgewählten Regressionsmodell für Verbrenner, E-Auto ohne AVAS und E-Auto mit AVAS vorhergesagte TTC-Schätzungen für die Beschleunigungsfahrten bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von 10 km/h als Funktion der gefahrenen Beschleunigung (x-Achse), der Fahrzeugtypen (farbliche Kodierung) und der tatsächlichen TTC (Spalten). Für die Vorhersage wurde die mittlere im Experiment bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von 10 km/h erreichte Geschwindigkeit bei Okklusion von 26.69 km/h angenommen. Die graue, gestrichelte Linie repräsentiert die tatsächliche TTC. Die gelbe, gestrichelte Linie repräsentiert eine first-order TTC-Schätzung. Rot: Verbrenner. Blau: E-Auto ohne AVAS. Grün: E-Auto mit AVAS.

Darüber hinaus wurden im Experiment 1 bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von 20 km/h ebenfalls alle drei Fahrzeugtypen (Verbrenner, E-Auto ohne AVAS, E-Auto mit AVAS) mit einer niedrigeren Beschleunigung von 0.6 m/s^2 präsentiert. Bei dieser Beschleunigung war zumindest in der Anfangsphase der Beschleunigung das AVAS des E-Autos noch aktiv. Wie in Abbildung 11 (zweite Spalte) zu sehen, lagen bei den Beschleunigungsfahrten mit einer Ausgangsgeschwindigkeit von 20 km/h und leichter Beschleunigung die mittleren geschätzten TTCs für die E-Autos mit und ohne AVAS für sehr nah beieinander, wobei sie länger geschätzt und stärker überschätzt wurden als für den Verbrenner. Dieses

Muster war für alle tatsächlichen TTCs zu beobachten, wobei die Unterschiede mit steigender TTC deskriptiv leicht zunahmen. In drei Bonferroni-korrigierten paarweisen Vergleichen wurde bestätigt, dass sich die geschätzten TTCs für den Verbrenner signifikant länger waren als für das E-Auto ohne AVAS, $t(89) = 6.00$, $p_{Bonf} < .001$, $d_z = 1.10$, und E-Auto mit AVAS, $t(89) = 5.69$, $p_{Bonf} < .001$, $d_z = 1.04$. Dahingegen unterschieden sich die mittleren TTC-Schätzungen für E-Auto mit und ohne AVAS nicht signifikant, $t(89) = 0.22$, $p_{Bonf} = 1.000$. Demnach lässt sich auch für die Beschleunigungsfahrten mit einer Ausgangsgeschwindigkeit von 20 km/h folgern, dass die Beschleunigung der E-Autos mit und ohne AVAS weniger Berücksichtigung bei der TTC-Schätzung fand als die des Verbrenners, vermutlich aufgrund der weniger salienten akustischen Signatur des E-Autos.

3.2.3 Zusammenfassung der Ergebnisse von Experiment 1

Die Daten aus Experiment 1 bestätigen überwiegend unsere Hypothesen. Für mit konstanter Geschwindigkeit fahrende Fahrzeuge zeigte sich kein substanzieller Effekt des Fahrzeugtyps auf die TTC-Schätzungen. Diese lagen für Verbrenner, E-Fahrzeug ohne AVAS und E-Fahrzeug mit AVAS relativ nah beieinander. Dieser Befund ist im Einklang mit früheren Studien, die keinen wesentlichen multimodalen Vorteil zusätzlicher akustischer Information im Vergleich zu einer rein visuellen Bedingung fanden, wenn die TTC von sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegenden Objekten geschätzt wurde. Entgegen unserer Erwartung zeigte sich auch kein signifikanter intensity-arrival Effekt (DeLucia, et al., 2016), also längere geschätzte TTCs für das bei niedrigen Geschwindigkeiten leisere E-Auto. Im Gegensatz dazu zeigte sich für die Beschleunigungsfahrten ein deutlicher und systematischer Effekt des Fahrzeugtyps auf die TTC-Schätzungen. Für die *E-Fahrzeuge* lagen die TTC-Schätzungen nahe an einer TTC-Schätzung erster Ordnung, die eine Nicht-Berücksichtigung der Beschleunigung repräsentiert und die in der Literatur auch konsistent für eine rein visuelle Darbietung gefunden wird (z.B. Benguigui, et al., 2003). Mit zunehmender Beschleunigung und zunehmender tatsächlicher TTC wurde die Kontaktzeit hier deutlich überschätzt. Die Versuchspersonen nahmen also die Zeit bis zum Eintreffen des Fahrzeugs an ihrer Position als länger wahr, als sie tatsächlich betrug. Diese TTC-Überschätzung könnte in einer realen Verkehrssituation zu riskantem Verhalten von Fußgänger:innen führen. Im Gegensatz dazu war die Überschätzung der TTC bei Beschleunigung für die *Verbrenner* deutlich geringer ausgeprägt. Experiment 1 zeigt also zum ersten Mal, dass die durch ein Verbrennungsfahrzeug emittierte akustische Information die

Kontaktzeitschätzungen für Beschleunigungsfahrten verbessert. Im Vergleich dazu konnten unsere Proband:innen die akustische Information der E-Fahrzeuge deutlich schlechter nutzen. Das bei niedrigen Geschwindigkeiten aktive AVAS verbesserte die TTC-Schätzungen für die E-Fahrzeuge in Beschleunigung etwas, ohne jedoch das präzisere Niveau der Schätzungen für den Verbrenner zu erreichen. Zusammenfassend kann also die Schlussfolgerung gezogen werden, dass im Fall von beschleunigten Heranfahrrten die im Gegensatz zu Verbrennern geänderte akustische Signatur von E-Fahrzeugen aufgrund der beobachteten Überschätzung der Kontaktzeit ein mögliches Risiko für Fußgänger:innen darstellt.

4 Experiment 2: Entscheidungen in Straßenüberquerungssituationen („Street-Crossing“)

Für die sichere Überquerung einer befahrenen Straße gilt es als Fußgänger:in, innerhalb kurzer Zeit zu entscheiden, ob die Straße noch vor einem herannahenden Fahrzeug sicher zu überqueren ist. Dafür muss eine TTC-Schätzung vorgenommen werden, also der verbleibende zeitliche Abstand zum sich nähernden Fahrzeuges auf Kollisionskurs eingeschätzt werden (z.B. D. N. Lee, et al., 1984). Die geschätzte verbleibende Zeit muss dann mit der geschätzten für die Überquerung der Fahrbahn notwendigen Zeit verglichen werden. Wenn die TTC des Fahrzeugs zum Zeitpunkt der Entscheidung kürzer als die zum Überqueren der Fahrbahn notwendige Zeit ist, so ist eine sichere Straßenüberquerung nicht möglich.

Die Ergebnisse von Experiment 1 dieser Studie zeigen klar, dass die Beschleunigung von Fahrzeugen, insbesondere bei E-Fahrzeugen, bei der Kontaktzeitschätzung nicht adäquat berücksichtigt wird. Dies steht im Einklang mit Studien zur rein visuellen TTC-Schätzung, die konsistent eine unzureichende Berücksichtigung von Beschleunigung zeigen (Benguigui, et al., 2003; Bootsma & Oudejans, 1993; Kaiser & Hecht, 1995). Insofern legen die in Experiment 1 beobachteten Überschätzungen der TTC mit zunehmender Beschleunigung wie oben diskutiert nahe, dass Fußgänger:innen im Fall beschleunigender Fahrzeuge riskantere Straßenüberquerungsentscheidungen treffen könnten, und dies im stärkeren Ausmaß bei E-Fahrzeugen als bei Verbrennern.

In Experiment 2 wurden daher konkret die Straßenüberquerungsentscheidungen in verschiedenen Verkehrssituationen untersucht. Dafür wurden in derselben VR-Simulation wie in Experiment 1 Straßenüberquerungsentscheidungen in Abhängigkeit

von den auch in Experiment 1 präsentierten Geschwindigkeitsprofilen (Beschleunigungs- und Konstantfahrten) und Fahrzeugtypen (Verbrenner, E-Auto ohne AVAS, E-Auto mit AVAS) erfasst. Ähnlich wie in Experiment 1 wurde auch in Experiment 2 eine virtuelle Straßenszene mit einem einzelnen sich nähernden Fahrzeug audiovisuell dargeboten (siehe 2.6). Die Versuchspersonen schätzten jedoch nicht wie in Experiment 1 die Kontaktzeit, sondern beurteilten nun, ob sie zu einem bestimmten Zeitpunkt während der Heranfahrt des Fahrzeugs eine sichere Straßenüberquerung initiieren könnten oder nicht. Ziel war es, herauszufinden, ob eine Heranfahrt eines E-Fahrzeuges – insbesondere in Beschleunigung – verglichen mit einem Verbrenner mit einem riskanteren Überquerungsverhalten verbunden war. Ein riskanteres Überquerungsverhalten würde sich zeigen, wenn vermehrt auch kurze TTCs (kurze verbleibende Zeit bis zum Eintreffen des Fahrzeuges an der Position der Fußgänger:in) für eine Straßenüberquerung akzeptiert werden. Zur Untersuchung der Straßenüberquerungsentscheidungen wurde ein Okklusionsparadigma verwendet. Wie in der in Experiment 1 für die Messung der TTC-Schätzungen verwendeten Prediction-Motion Aufgabe wurde die Präsentation des Fahrzeugs zu einem spezifisch festgelegten Zeitpunkt während der Heranfahrt beendet ("Okklusion"). Die Versuchsperson sollte anschließend beurteilen, ob sie zum Zeitpunkt der Okklusion noch eine sichere Straßenüberquerung hätte beginnen können oder nicht (z.B. Baurès, Oberfeld, Tournier, Hecht, & Cavallo, 2014; Petzoldt, 2014).

Die Verwendung qualitativ hochwertiger Audioaufnahmen, räumlicher Darbietung der akustischen Stimuli und immersiver visueller Animationen bildeten eine realitätsnahe Versuchsumgebung, in der das Straßenüberquerungsverhalten von Menschen erstmalig im Kontext von heranfahrenden konventionellen Verbrennern und Elektrofahrzeugen mit und ohne einsetzende Beschleunigung untersucht wurde.

4.1 Methode

4.1.1 Versuchsbedingungen und Design

Die für Experiment 2 ausgewählten Versuchsbedingungen und deren Implementierung orientierten sich an den in Experiment 1 verwendeten und verfügbaren Versuchsbedingungen. Dabei wurden insgesamt 13 Bedingungen verwendet (siehe Tabelle 5). Auch wenn mehr Versuchsbedingungen zur Verfügung standen (siehe Tabelle 2), musste die Anzahl der Versuchsbedingungen reduziert werden, um die Versuchszeit für jede einzelne Versuchsperson in einem vertretbaren Rahmen zu halten.

Mit der getroffenen Auswahl wurden alle Beschleunigungen präsentiert, die Bandbreite der gefahrenen Geschwindigkeiten abgedeckt sowie der Einbezug aller drei Fahrzeugtypen vorgenommen. Darüber hinaus wurde bei der Auswahl der Geschwindigkeitsprofile der Beschleunigungsfahrten darauf geachtet, dass die Endgeschwindigkeiten bei Okklusion (nach 3 s Beschleunigung) näherungsweise die Geschwindigkeiten der Konstantfahrten abdecken (siehe Tabelle 5) und außerdem nicht wesentlich über der innerorts zu erwartenden Maximalgeschwindigkeit liegen.

Tabelle 5: In Experiment 2 präsentierte Geschwindigkeitsprofile und entsprechende Anzahl der akustischen Aufnahmen pro Geschwindigkeitsprofil und Fahrzeugtyp.

Geschwindigkeitsprofil		Fahrzeugtyp		
a [m/s ²]	v_0 [km/h]	Verbrenner	E-Auto	E-Auto mit AVAS
0.0	10	3	2	2
0.0	30	1	4	
0.0	50	2	1	
0.6	10	3	3	3
2.0	10	3	3	4

In der Analyse der Straßenüberquerungsentscheidungen wurde in Experiment 2 für jede der 13 Versuchsbedingungen die TTC zum Zeitpunkt der Okklusion geschätzt, bei der die Versuchsperson indifferent war, ob sie die Straße überqueren würde oder nicht, also bei der sie sich in 50% der Trials für eine Straßenüberquerung entschied und in 50% der Trials dagegen. Dieser in Folge als $TTC_{50\%}$ bezeichnete Wert charakterisiert für jede Versuchsbedingung das Entscheidungsverhalten der Versuchspersonen. Eine kürzere $TTC_{50\%}$ entspricht einem riskanteren Entscheidungsverhalten als eine längere $TTC_{50\%}$.

4.1.2 Straßenszene, Trialablauf und Aufgabe

Die in Experiment 2 dargebotenen Straßenszene (Abbildung 14) waren größtenteils identisch zu Experiment 1. Auf der Basis eines Vortests mit sieben Versuchspersonen wurden jedoch drei Aspekte gegenüber Experiment 1 verändert. In Experiment 2 umfasste die dargestellte Straße nur einen Fahrstreifen; die Häuserwand auf der gegenüberliegenden Straßenseite (aus Perspektive der Versuchsteilnehmer:in) wurde so verschoben, dass genau gegenüber der Versuchsteilnehmer:in eine

Haustür zu sehen war; die blaue Orientierungslinie markierte nun den hypothetischen Überquerungsweg von der Position der Versuchsperson zur Haustür auf der gegenüberliegenden Straßenseite. Diese Modifikationen beugten Missverständnissen bezüglich der Aufgabeninstruktion vor, die sich im Vortest mit den Szenen aus Experiment 1 herausgestellt hatten. Im Kontext dieser Straßenszene wurden Fahrzeuge dargeboten, die einer Teilmenge der in Experiment 1 verwendeten Kombinationen aus Geschwindigkeitsprofil und Fahrzeugtyp entsprachen (siehe Tabelle 5).



Abbildung 14: Ansicht der virtuellen einstreifigen Straße aus Perspektive der Versuchsperson in Experiment 2.

Die Versuchsperson startete den Trial per Knopfdruck, woraufhin sich das Fahrzeug in Bewegung setzte. Nach 5.0 s Präsentationszeit ($dur_{vis} = dur_{preacc} + dur_{postacc} = 2.0 \text{ s} + 3.0 \text{ s}$) verschwand zum Zeitpunkt t_{occ} das Fahrzeug vom Display und war nicht mehr hörbar (Okklusion). Allerdings waren die TTCs zum Okklusionszeitpunkt in Experiment 2 nicht wie in Experiment 1 a-priori festgesetzt, sondern wurden adaptiv in Abhängigkeit von den Entscheidungen der Versuchsteilnehmer:innen angepasst. Dieses Verfahren wird in Abschnitt 4.1.3 näher erläutert. Mit Einsetzen der Okklusion beurteilten die Teilnehmer:innen, ob sie zu diesem Zeitpunkt in ihrem gewohnten, zügigen Gehtempo sicher über die Straße zur gegenüberliegenden Haustür hätten gehen können. Die Versuchsteilnehmer:in konnte entweder angeben, dass er oder sie die Straße noch sicher vor dem Auto begonnen hätte oder nicht (two-alternative, forced-choice Aufgabe). Seine Entscheidung gab er per Knopfdruck auf den oberen (positive Entscheidung) bzw. unteren (negative Entscheidung) Rand des runden Touchpads Controllers an, welchen er in der Hand hielt. Wenn die Versuchsperson angab, dass sie die Straßenüberquerung zum Okklusionszeitpunkt noch begonnen hätte, wird dies in Folge als *positive Antwort* bezeichnet. Eine *negative Antwort*

bezeichnet entsprechend die Entscheidung gegen den Beginn einer Straßenüberquerung zum Okklusionszeitpunkt.

4.1.3 Adaptive Prozedur und Datenauswertung

Für jede Kombination aus Versuchsperson, Fahrzeugtyp, Ausgangsgeschwindigkeit und Beschleunigung wurden mittels eines adaptiven Verfahrens drei Punkte auf der psychometrischen Funktion getrackt, die den Zusammenhang zwischen der TTC und der Wahrscheinlichkeit einer positiven Überquerungsentscheidung abbildet. Für den 50 %-Punkt wurde eine "simple up-down" (1-down, 1-up) Regel (Levitt, 1971) verwendet. Wenn die Versuchsperson im aktuellen Trial angab, die Straßenüberquerung sicher initiieren zu können, wurde die TTC zum Okklusionszeitpunkt im nächsten Trial reduziert. Andernfalls wurde die TTC im nächsten Trial erhöht. Für jede vorhandene Aufnahme einer Konstantfahrt wurde dabei (wie auch bei den beiden anderen adaptiven Regeln) der daraus dargebotene Zeitabschnitt variiert, indem aus der zur Verfügung stehenden Aufnahmedauer von maximal 30 s ein Abschnitt von 5.0 s zufällig ausgewählt wurde. Bei den Beschleunigungsfahrten war der dargebotene Zeitabschnitt auf 2.0 s vor und 3.0 s nach Einsetzen der Beschleunigung festgelegt, wie in Experiment 1. Der 79.4% Punkt auf der psychometrischen Funktion wurde mittels einer 3-down, 1-up Regel getrackt (Levitt, 1971). Wenn die Versuchsperson in drei aufeinanderfolgenden Trials angab, die Straßenüberquerung zum Okklusionszeitpunkt noch sicher initiieren zu können, wurde die TTC im darauffolgenden Trial reduziert. Wenn die Versuchsperson hingegen im aktuellen Trial angab, die Straßenüberquerung zum Okklusionszeitpunkt nicht mehr sicher initiieren zu können, wurde die TTC im darauffolgenden Trial erhöht. Der 20.6% Punkt ($TTC_{20.6\%}$) wurde mittels einer 3-up, 1-down Regel getrackt, in der nach drei aufeinanderfolgenden negativen Entscheidungen die TTC durch Multiplikation der TTC im vorherigen Trial desselben Tracks um einen Faktor f_{adap} erhöht und nach jeder positiven Entscheidung die TTC durch Division durch denselben Faktor f_{adap} reduziert wurde.

In der Anpassung der TTC wurden in allen adaptiven Tracks zwei verschiedene Schrittgrößen (Faktor f_{adap}) verwendet. Zu Beginn jedes Tracks wurde der Faktor auf $f_{adap} = 1.3$ gesetzt, um sich der TTC des jeweiligen Punktschätzers rasch anzunähern. Ab dem dritten Reversal wurde der Faktor auf $f_{adap} = 1.1$ reduziert, um die Schätzung des jeweiligen Punktes zu präzisieren. Reversals sind die Wendepunkte in der Sequenz von positiven und negativen Antworten innerhalb eines adaptiven Tracks (Levitt, 1971).

Die Wahl der im ersten Trial eines adaptiven Tracks dargebotenen initialen TTC ist bei adaptiven Verfahren zwar unkritisch, effizient sind jedoch initiale TTCs, die nicht zu weit von der TTC entfernt ist, auf die der jeweilige adaptive Track konvergiert. Die Auswahl der initialen TTC orientierte sich ähnlich wie in Experiment 1 an der mittleren Gehgeschwindigkeit von Fußgängern:innen, die ungefähr bei 1.44 m/s liegt (Ishaque & Noland, 2008). Mit dieser Gehgeschwindigkeit ließe sich der vom Fahrzeug befahrene 3.25 m breite Fahrstreifen in 2.26 s überqueren. Frühere Studien berichteten einen mittleren Safety Margin von etwa 1.5 s (Baurès, et al., 2014; Domes, Cavallo, Dubuisson, Tournier, & Vienne, 2014; Oxley, Ihsen, Fildes, Charlton, & Day, 2005). Die initiale TTC wurde konservativ für alle adaptiven Tracks auf 2.26 s (Überquerungszeit) + 1.5 s (Safety Margin) \approx 5 s festgesetzt.

Die adaptiven Tracks der 20.6 %- und 79.4 %-Punkte wurden beendet, wenn eine Versuchsperson weitere neun Reversals mit kleiner Schrittgröße erzeugte, bzw. nach Präsentation von insgesamt 55 Trials. Die adaptiven Tracks des 50%-Punktes wurden dann beendet, wenn eine Versuchsperson weitere 14 Reversals mit kleiner Schrittgröße erzeugte – um auf eine mit den beiden anderen Regeln vergleichbare Trialanzahl zu kommen – oder nach insgesamt 55 Trials. Die 13 (Versuchsbedingungen) \times 3 (3-Down, 1-Up; 1-Down, 1-Up; 3-Up, 1-Down) adaptiven Tracks wurden zufällig verschachtelt dargeboten, um die Vorhersagbarkeit des nächsten Trials zu reduzieren, wie es auch in einer realen Straßenüberquerungssituation der Fall wäre.

In der Datenauswertung wurde für jede Versuchsperson und jede Versuchsbedingung eine psychometrische Funktion (kumulative Normalverteilungsfunktion) an die in den Trials jeder Versuchsbedingung erhobenen Daten angepasst, um den Zusammenhang zwischen der jeweils dargebotenen TTC bei Okklusion und der Wahrscheinlichkeit einer positiven Überquerungsentscheidung abzubilden. Dies erfolgte für jede der präsentierten Fahrzeugaufnahmen (siehe Tabelle 5), um der Variation der tatsächlich gefahrenen Beschleunigungen und Geschwindigkeiten bei Okklusion (siehe Abbildung 9) Rechnung tragen zu können. Es wurde ein maximum-likelihood Verfahren verwendet (siehe z.B. Treutwein & Strasburger, 1999). Pro Kombination aus Versuchsperson und Fahrzeugaufnahme gingen zwischen 12 und 151 Trials ($M = 42.2$ Trials) in den Fit der psychometrischen Funktion ein. Der geschätzte Mittelwert der kumulativen Normalverteilungsfunktion (μ) entspricht dem 50 %-Punkt auf der psychometrischen Funktion. Er schätzt $TTC_{50\%}$, also die TTC bei Okklusion, bei der die Versuchsperson sich in 50% der Trials für und in 50% der Trials gegen eine Überquerung entscheiden würde, also indifferent hinsichtlich der Überquerungsentscheidung war. Die geschätzte

Standardabweichung der kumulativen Normalverteilungsfunktion ($\sigma\hat{\sigma}$) ist ein Maß dafür, wie stark sich die Wahrscheinlichkeit einer positiven Überquerungsentscheidung mit der dargebotenen TTC ändert. Bei hohen Werten von σ ist die psychometrische Funktion flach, eine Änderung der TTC bei Okklusion um einen bestimmten Wert hat also nur einen geringen Effekt auf die Wahrscheinlichkeit einer positiven Straßenüberquerungsentscheidung. Der Parameter σ repräsentiert insofern die Sensitivität der Versuchsperson hinsichtlich Änderungen der TTC bei Okklusion.

Die Anpassungsgüte wurde mittels der Standardfehler der geschätzten Parameter erfasst. Fits, bei denen der Standardfehler von μ größer als 0.8 s war, wurden von der Analyse ausgeschlossen. Dies betraf 44 der insgesamt 850 angepassten psychometrischen Funktionen.

4.1.4 Stichprobe

Insgesamt nahmen 29 Versuchspersonen an Experiment 2 teil. Zwei Personen erfüllten die Kriterien zur Seh- bzw. Hörfähigkeit nicht (dieselben Kriterien wie in Experiment 1, siehe Abschnitt 3.1.5). Von den restlichen 27 Versuchspersonen mit normalen Seh- und Hörfähigkeiten brach eine Versuchsperson das Experiment wegen frühzeitig aufgetretener Motion Sickness und eine Versuchsperson aufgrund von Ermüdung ab. Somit standen für die Auswertung die vollständigen Daten von 25 Versuchspersonen (18 weiblich, 7 männlich; Alter $M = 22.84$ Jahre, $SD = 3.87$ Jahre) zur Verfügung.

4.1.5 Vorbereitung

Wie in Experiment 1 bestätigten die Versuchsteilnehmer:innen schriftlich ihr Einverständnis, absolvierten Vortestungen, gaben ihr anfängliches Wohlbefinden auf der Fast Motion Sickness Scale (Keshavarz & Hecht, 2011) an und lernten den Versuchsaufbau kennen. Vorbereitend für die Aufgabe im späteren Street Crossing Experiment wurden die Versuchspersonen angeleitet, im Flur des Laborbereichs eine markierte Strecke, die eine Straße skizzierte, in ihrem gewöhnlichen, zügigen Gehtempo zu „überqueren“. Dazu standen sie an einer Markierung, die eine der beiden Bordsteinkanten einer Straße darstellen sollte und wurden gebeten, sich vorzustellen, dass auf der anderen Seite der Straße ihr Zuhause sei und sie gerne zu ihrer Haustür laufen wollten. In 3.25 m Entfernung von der Startmarkierung befand sich eine weitere Markierung, die die andere Bordsteinkante darstellen sollte. Die zu überwindende Strecke von 3.25 m entsprach von ihrer Länge her genau der Breite der Straße, die im Experiment in der virtuellen Umgebung dargestellt wurde.

Die Versuchspersonen sollten sich vorstellen, dass die zu überquerende Straße zwar recht dicht befahren sei, dass sich jedoch jetzt ein passender Moment ergebe, um die Straße sicher zu überqueren. Nun sollte die Versuchsperson die „Straße überqueren“ ohne zu rennen oder zu trödeln. Die Versuchsleiter:in stoppte die Zeit, die die Versuchsperson brauchte, um von der einen Markierung zur anderen Markierung zu gelangen. Der Vorgang wurde fünf Mal wiederholt und diente primär dazu, dass sich die Versuchsperson darüber bewusst wurde, was ihr gewöhnliches, zügiges Gehtempo war. Zum anderen konnte so die mittlere Überquerungszeit für jede Versuchsperson ermittelt werden ($M = 2.49$ s, $SD = 0.42$ s, min = 1.83 s, max = 3.48 s).

Als weitere Vorbereitung auf das Street Crossing Experiment wurden der Versuchsperson im Versuchssetup fünf virtuelle Heranfahrten eines Fahrzeuges präsentiert. Das Fahrzeug fuhr auf der Straße mit einer Präsentationsdauer von 15 s bis zur Position der Versuchsperson heran. Durch die lange Präsentationsdauer konnte die Versuchsperson das Fahrzeug ausreichend beobachten und sollte sich überlegen, wann für sie der letzte Moment für eine sichere Straßenüberquerung in ihrem gewöhnlichen, zügigen Gehtempo wäre. Dabei sollte sich die Versuchsperson erinnern, was ihr gewöhnliches, zügiges Gehtempo auf der markierten Straße im Flur war und dieses nun als Entscheidungsgrundlage heranziehen.

4.1.6 Versuchsablauf

Vor Beginn der Straßenüberquerungsaufgabe wurden die Teilnehmer:innen instruiert und bearbeiteten 31 Trainingstrials.

Der Experimententeil umfasste insgesamt 39 adaptive Tracks (13 Bedingungen \times 3 adaptive Regeln). Die Versuchsperson hatte die Möglichkeit alle 20 Minuten eine kurze Pause zu machen. Alle 60 Minuten wurde die Versuchsperson ausdrücklich gebeten, eine längere Pause einzulegen. In den Pausen wurde die Versuchsperson gebeten, ihr momentanes Befinden auf der FMS anzugeben.

Durch die adaptive Testprozedur war im Vorfeld nicht genau abzuschätzen, wie lange eine Sitzung dauern würde. Allerdings war ein Maximum von 55 Trials pro adaptivem Track festgelegt, so dass die Zumutbarkeit des Experiments gewährleistet werden konnte. Die Versuchspersonen absolvierten zwischen 1261 und 1701 Trials und die meisten von ihnen brauchten zur Bearbeitung der Vortestungen, Vorbereitungen und des Experiments (inklusive der Pausenzeiten) ca. 5.5 Stunden. Nach Abschluss der Street Crossing Aufgaben füllten die Versuchsteilnehmer:innen einen

Abschlussfragenbogen auf, der wie in Experiment 1 das Präsenzgefühl abfragte (siehe 3.1.6).

4.2 Ergebnisse und Diskussion

Wie in Experiment 1 werden im Folgenden die Analyse der $TTC_{50\%}$ in der Street-Crossing Aufgabe separat für Konstant- und Beschleunigungsfahrten berichtet. Nach der Analyse der $TTC_{50\%}$ folgen Analysen der Kollisionswahrscheinlichkeit unter Berücksichtigung der individuellen Gehgeschwindigkeiten der Versuchspersonen.

4.2.1 $TTC_{50\%}$ und Kollisionswahrscheinlichkeit bei den Konstantfahrten

Im Experiment wurden Konstantfahrten mit 10, 30 und 50 km/h präsentiert, wobei nur bei der niedrigsten konstanten Geschwindigkeit das E-Auto mit AVAS präsentiert werden konnte. Unterschiede in der $TTC_{50\%}$ wurden mittels zweier LMMs mit random intercept analysiert. Für jede Kombination aus Versuchsperson und Versuchsbedingung (Tabelle 5) wurden die geschätzten $TTC_{50\%}$ über die in der jeweiligen Bedingung präsentierten Fahrzeugaufnahmen aggregiert. Ähnlich wie in Experiment 1 wurden zwei separate Analysen durchgeführt. Die erste Analyse bezog sich auf die Konstantfahrten von Verbrenner und E-Auto bei allen nominalen Geschwindigkeiten v_0 (10, 30, 50 km/h). Sie testete Haupt- und Interaktionseffekte der Faktoren Fahrzeugtyp und Geschwindigkeit v_0 . Die zweite Analyse bezog sich auf Unterschiede zwischen allen drei Fahrzeugtypen bei einer Geschwindigkeit von 10 km/h, da nur bei dieser Geschwindigkeitsstufe das E-Auto mit AVAS aktiv war. Sie testete den Haupteffekt des dreistufigen Faktors Fahrzeugtyp.

In Abbildung 17 ist auf der x-Achse die nominale Geschwindigkeit v_0 und auf der y-Achse die $TTC_{50\%}$ dargestellt. Die farbliche Kodierung gibt Aufschluss über die Fahrzeugtypen. Über alle konstanten Geschwindigkeiten hinweg wurden ähnliche $TTC_{50\%}$ für Verbrenner und E-Auto gemessen, der Haupteffekt des Fahrzeugtyps war nicht signifikant ($F(1,117) = 3.14, p = .079$). Deskriptiv war die mittlere $TTC_{50\%}$ bei 10 km/h für alle Fahrzeugtypen am höchsten. Bei höheren Geschwindigkeiten von 30 und 50 km/h war die mittlere $TTC_{50\%}$ für Verbrenner und E-Auto vergleichsweise etwas niedriger. Der signifikante Haupteffekt bestätigte die Unterschiede zwischen den Geschwindigkeitsstufen ($F(2,117) = 56.40, p < .001$). Anschließende paarweise Mittelwertsvergleiche (anhand von Least-Squares Means) mit Bonferroni-Korrektur betätigten, dass sich die Versuchspersonen bei einer niedrigen konstanten Geschwindigkeit von 10

km/h erst bei längeren TTCs bei Okklusion für eine Straßenüberquerung entschieden als bei höheren konstanten Geschwindigkeiten von 30 km/h ($t(117) = 9.43$, $p_{Bonf} < .001$, $d_z = 1.89$) und 50 km/h ($t(117) = 9.14$, $p_{Bonf} < .001$, $d_z = 1.83$). Die $TTC_{50\%}$ unterschied sich zwischen 30 und 50 km/h nicht statistisch signifikant voneinander, ($t(117) = -0.30$, $p_{Bonf} > .99$). In Abbildung 15 zeigen sich ab 30 km/h kleinere deskriptive Unterschiede zwischen Verbrenner und E-Auto. Die Interaktion zwischen Fahrzeugtyp und Geschwindigkeit war jedoch statisch nicht signifikant, ($F(2,117) = 2.11$, $p < .126$). Demnach war der Effekt der Geschwindigkeit auf $TTC_{50\%}$ für Verbrenner und E-Auto relativ ähnlich.

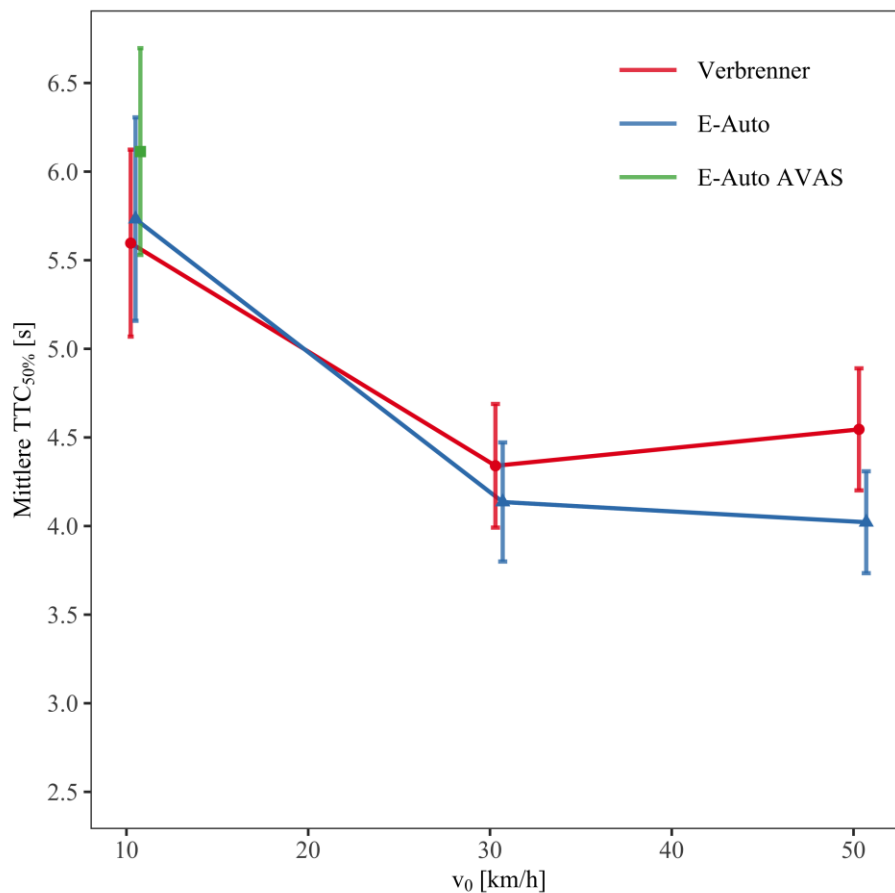


Abbildung 15: Mittlere akzeptierte TTC bei den Konstantfahrten in Experiment 2 als Funktion der konstanten Geschwindigkeit v_0 und des Fahrzeugtyps. Rot: Verbrenner. Blau: E-Auto ohne AVAS. Grün: E-Auto mit AVAS. Die Fehlerbalken zeigen ± 1 Standardfehler des Mittelwerts.

In der zweiten Analyse, die alle drei Fahrzeugtypen bei 10 km/h untersuchte, zeigte sich deskriptiv eine etwas längere $TTC_{50\%}$ für das E-Auto mit AVAS ($M = 6.11$ s, $SD = 2.92$ s) als für das E-Auto ($M = 5.73$ s, $SD = 2.75$ s) und den Verbrenner ($M = 5.60$ s, $SD = 2.58$ s). Anschließende

paarweise Mittelwertsvergleiche (Least-Squares) mit Bonferroni-Korrektur betätigten, dass die zeitlichen Lücken für das E-Auto mit AVAS signifikant länger gewählt wurden als für den Verbrenner ($t(45) = -3.68$, $p = .002$, $d_z = 0.15$) und für das E-Auto ohne AVAS ($t(45) = -2.71$, $p = .029$, $d_z = 0.11$). Diese Effekte sind statistisch jedoch als eher klein zu beurteilen (Cohen, 1988). Bei einer Geschwindigkeit von 10 km/h hatte das AVAS also nur einen kleinen, aber positiven Effekt auf die $TTC_{50\%}$.

Anhand der individuellen gefitteten psychometrischen Funktionen (geschätzte Parameter μ und σ) kann berechnet werden, wie wahrscheinlich eine Straßenüberquerungsentscheidung ist, die zu einer Kollision zwischen Fußgänger:in und Fahrzeug führen würde. Unter der Annahme, dass das Fahrzeug nicht durch Bremsen auf die Fußgänger:in reagiert, würde eine Kollision resultieren, wenn sich die Versuchspersonen für das Überqueren der Straße entscheiden, obwohl die TTC bei Okklusion kürzer als die für die Überquerung der Straße notwendige Zeit ist. Für jede Versuchsperson und jede Fahrzeugaufnahme wurde anhand der gefitteten psychometrischen Funktion berechnet, wie wahrscheinlich eine positive Straßenüberquerungsentscheidung war, wenn die TTC bei Okklusion unter der individuellen mittleren Überquerungszeit lag. Die Wahrscheinlichkeit einer solchen riskanten Entscheidung wird in Folge auch als *Kollisionswahrscheinlichkeit* p_{coll} bezeichnet. Für die Analyse von p_{coll} wurden wiederum die über die pro Kombination aus Versuchsperson und Versuchsbedingung aggregierten Daten herangezogen. Abbildung 16 zeigt die mittlere *Kollisionswahrscheinlichkeit* p_{coll} für alle Geschwindigkeiten und Fahrzeugtypen. Sie lag im Mittel unter 20%. Für das E-Fahrzeug ($M = 19\%$, $SD = 29\%$) war p_{coll} deskriptiv minimal höher als für den Verbrenner ($M = 17\%$, $SD = 29\%$). Dieser Unterschied war jedoch statistisch nicht signifikant ($F(1,117) = 0.91$, $p = .343$). Die mittlere Kollisionswahrscheinlichkeit war für alle konstanten Geschwindigkeiten v_0 ähnlich ausgeprägt ($F(2,117) = 2.91$, $p = .059$). Die Interaktion zwischen Fahrzeugtyp und Geschwindigkeit war ebenfalls nicht signifikant ($F(2,117) = 0.35$, $p = .704$). Bei einer konstanten Geschwindigkeit von 10 km/h hingegen war die Kollisionswahrscheinlichkeit für das E-Auto mit AVAS ($M = 13\%$, $SD = 23\%$) relativ zu Verbrenner ($M = 16\%$, $SD = 26\%$) und E-Auto ohne AVAS ($M = 17\%$, $SD = 25\%$) leicht reduziert. Aber auch dieser Effekt war statistisch nicht signifikant ($F(2,45) = 1.60$, $p = .213$).

Insgesamt lässt sich also für die Konstantfahrten festhalten, dass die verschiedenen akustischen Signaturen der drei Fahrzeugtypen keinen maßgeblichen Einfluss auf das Kollisionsrisiko hatten.

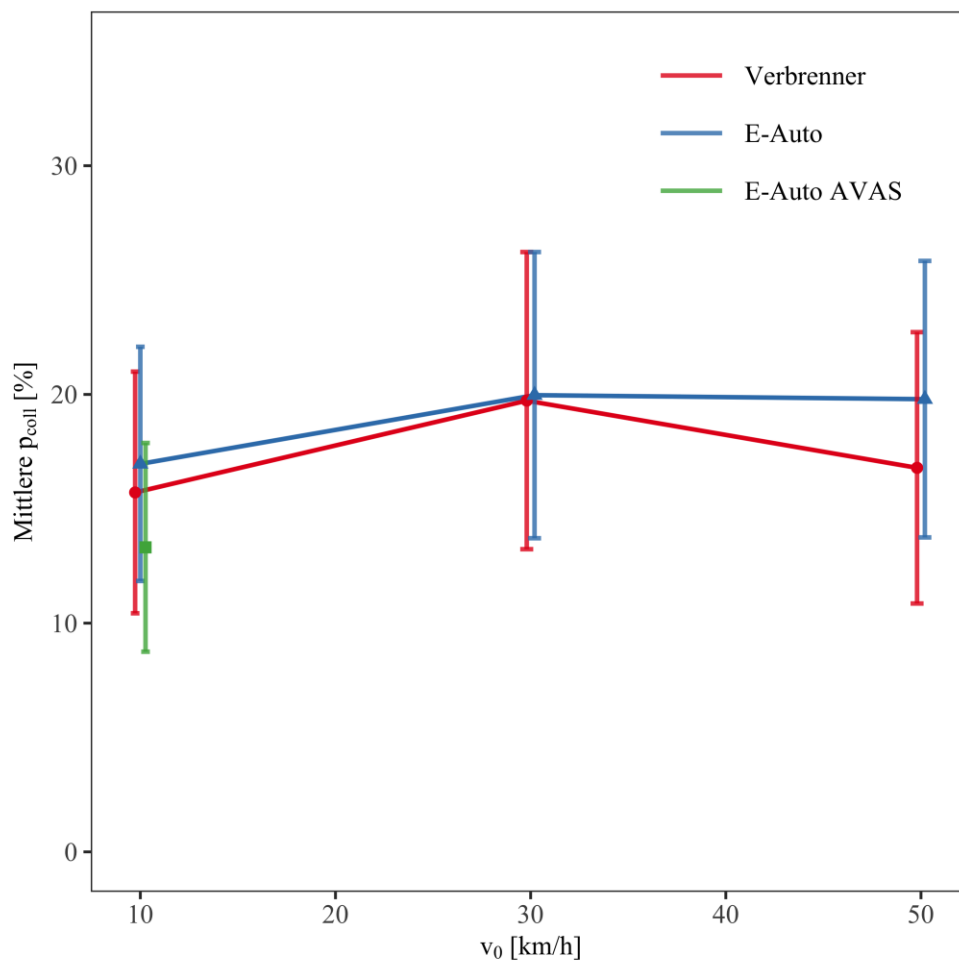


Abbildung 16: Konstantfahrten in Experiment 2. Mittlere Kollisionswahrscheinlichkeit (Wahrscheinlichkeit einer positiven Straßenüberquerungsentscheidung, wenn die TTC bei Okklusion kürzer als die individuelle mittlere Überquerungszeit der Straße war) als Funktion der konstanten Geschwindigkeit v_0 und des Fahrzeugtyps. Rot: Verbrenner. Blau: E-Auto ohne AVAS. Grün: E-Auto mit AVAS. Die Fehlerbalken zeigen ± 1 Standardfehler des Mittelwerts.

4.2.2 TTC_{50%} und Kollisionswahrscheinlichkeit bei den Beschleunigungsfahrten

Bei den im Experiment präsentierten Beschleunigungsfahrten waren alle drei Fahrzeugtypen gleichermaßen vertreten (siehe Tabelle 5). Für die Beschleunigungsfahrten ($n = 296$ PMFs) wurde ein 10-faches Kreuzvalidierungsverfahren angewandt (wie bereits in Experiment 1, siehe 3.2.2), um ein robustes Regressionsmodell zu formulieren, für das ein geringer Vorhersagefehler für zukünftige Datensätze erwartet werden kann (Yarkoni & Westfall, 2017). Aus den Faktoren *Fahrzeugtyp*, *tatsächliche Beschleunigung* a_{avg} und *tatsächliche Okklusionsgeschwindigkeit* v_{occ}

wurden 127 mögliche Kombinationen von Haupteffekten und Interaktionseffekten aufgestellt. Für jede von ihnen wurde der Vorhersagefehler als PRESS des linear mixed-effects models mit random Intercept (R Funktion *lmer()*) in der Kreuzvalidierung ermittelt. Dabei zeigten zwei Modelle den niedrigsten, identischen Vorhersagefehler (PRESS = 7.94). Folgendes Modell wurde aufgrund seiner Sparsamkeit (geringere Anzahl an Prädiktoren) für die Vorhersage der $TTC_{50\%}$ ausgewählt:

$$TTC_{50\%} \sim \text{Fahrzeugtyp} + \text{Fahrzeugtyp} \times a_{avg} + a_{avg} \times v_{occ} + (1|vp).$$

Das ausgewählte Regressionsmodell wurde mittels der R-Funktion *lmer()* an die Daten für die Beschleunigungsfahrten angepasst. Die Varianzkomponenten wurden anhand der Methode der beschränkten maximalen Wahrscheinlichkeit (REML) geschätzt. Für die statischen Tests wurde die Kenward-Roger Approximation der Freiheitsgrade verwendet (Kenward & Roger, 1997). Das Modell erklärte mit seinen random und fixed effects 89.98% der Varianz der Daten. Die Varianzaufklärung durch die fixed effects betrug $R^2_{marginal} = 0.14$. Im Folgenden werden die Typ-3 Tests der fixed effects des LMM berichtet. In Tabelle 6 sind die fixed effects des LMM dargestellt.

Tabelle 6: Experiment 2. Geschätzte fixed effects Parameter des Modells zur Vorhersage $TTC_{50\%}$ für die Beschleunigungsfahrten. Dargestellt sind die geschätzten Parameter (β), Standardfehler (SE), Freiheitsgrade (df), t- und p-Werte.

	β	SE	df	t	p
(Intercept)	4.66	0.26	31.46	17.77	< .001
E-Auto	-0.53	0.11	428.01	-4.78	< .001
E-Auto AVAS	-0.11	0.12	428.01	-0.88	.377
Verbrenner $\times a_{avg}$	-1.01	0.21	428.00	-4.90	< .001
E-Auto $\times a_{avg}$	-1.29	0.20	428.00	-6.33	< .001
E-Auto AVAS $\times a_{avg}$	-1.37	0.21	428.00	-6.62	< .001
$a_{avg} \times v_{occ}$	0.02	0.00	428.00	4.34	< .001

In Abbildung 16 ist die $TTC_{50\%}$ in Abhängigkeit von der tatsächlichen Beschleunigung a_{avg} (x-Achse) und des Fahrzeugtyps (farbliche Kodierung) dargestellt. Bei allen Beschleunigungen waren die $TTC_{50\%}$ höher für den Verbrenner als für die E-Autos. Der signifikante Effekt des Fahrzeugtyps bestätigte, dass sich die mittlere $TTC_{50\%}$ zwischen den Fahrzeugtypen unterschied ($F(2,428.01) = 13.39$, $p < .001$). Über die verschiedenen Beschleunigungen hinweg wurden sowohl für das E-Auto ohne AVAS ($M =$

3.27 s, $SD = 1.19$ s) als auch für das E-Auto mit AVAS ($M = 3.38$ s, $SD = 1.22$ s) kürzere zeitliche Lücken für eine Straßenüberquerung gewählt als für den Verbrenner ($M = 4.28$ s, $SD = 1.51$ s). Die Entscheidungen waren also potenziell riskanter bei herannahenden E-Autos.

In Abbildung 18 ist die durch das Regressionsmodell vorhergesagte $TTC_{50\%}$ als Funktion der Beschleunigung und für die drei Fahrzeugtypen dargestellt. Wie schon anhand der beobachteten Mittelwerte in Abbildung 17 deutlich wurde, unterschied sich die vorhergesagte $TTC_{50\%}$ zwischen E-Auto und Verbrenner signifikant (siehe Tabelle 6). Dahingegen wurde kein signifikanter Unterschied zwischen der $TTC_{50\%}$ für das E-Auto mit AVAS und den Verbrenner vorhergesagt (siehe Tabelle 6). Demnach wäre zu erwarten, dass für beschleunigende E-Autos ohne AVAS „knappere“ bzw. potenziell risikoreichere Straßenüberquerungsentscheidungen getroffen werden als für beschleunigende Verbrenner. Das aktivierte AVAS führte zu einer Reduktion dieses Effekts.

Mit steigender tatsächlicher Beschleunigung waren für den Verbrenner deskriptiv zwar leichte Schwankungen in der $TTC_{50\%}$ zu beobachten, sie hielten sich jedoch zwischen 4.00 und 4.43 s. Für das E-Auto mit und ohne AVAS war hingegen mit steigender Beschleunigung ein deutlicher Trend zum Abfall der $TTC_{50\%}$ zu erkennen. Dieses Muster wurde von einem signifikanten Interaktionseffekt zwischen Fahrzeugtyp und Beschleunigung bestätigt ($F(2,428.01) = 18.53$, $p < .001$). Von der niedrigsten gefahrenen Beschleunigung des Autos ohne AVAS bis zur höchsten fiel $TTC_{50\%}$ konsistent von 3.75 auf 2.98 s ab. Für das E-Auto mit AVAS war ein ähnlicher Trend zu erkennen, wenngleich die mittlere $TTC_{50\%}$ für das E-Auto mit AVAS deskriptiv etwas länger war als ohne AVAS. Dieser Effekt deutet darauf hin, dass die Beschleunigung bei den Straßenüberquerungsentscheidungen für den Verbrenner besser berücksichtigt werden konnten als für das E-Auto mit und ohne AVAS.

Wie in Abbildung 18 ersichtlich, liegt die vorhergesagte $TTC_{50\%}$ für das E-Auto mit AVAS nur bei niedrigen Beschleunigungen auf einem ähnlichen Level wie für den Verbrenner. Sobald jedoch die Beschleunigung ansteigt, wird vorhergesagt, dass sich die $TTC_{50\%}$ für das E-Auto mit AVAS stärker vom Verbrenner unterscheidet und sich dem E-Auto ohne AVAS annähert. Die vorhergesagte $TTC_{50\%}$ nimmt für das E-Auto mit und ohne AVAS stärker mit zunehmender Beschleunigung ab als für den Verbrenner (Abbildung 18). Somit wird aufgrund der in Experiment 2 erhobenen Daten vorhergesagt, dass mit steigender Beschleunigung sowohl für E-Autos ohne AVAS als auch für E-Autos mit AVAS zunehmend „knappere“ bzw. zunehmend potenziell risikoreichere Straßenüberquerungsentscheidungen getroffen werden als für Verbrenner.

Die signifikante Interaktion zwischen Beschleunigung und Okklusionsgeschwindigkeit ($F(2,428.00) = 18.81, p < .001$), zeigte, dass der Effekt der Beschleunigung auf die TTC-Schätzungen bei einer niedrigen Okklusionsgeschwindigkeit am stärksten war. So nimmt bei einer niedrigen Geschwindigkeit bei Okklusion die vorhergesagte $TTC_{50\%}$ in Abhängigkeit der Beschleunigung stärker ab als bei höheren Geschwindigkeiten (Abbildung 18). Insgesamt sagt das Modell also vorher, dass bei starken Beschleunigungen kürzere zeitliche Lücken gewählt werden, insbesondere dann, wenn die Geschwindigkeit bei Okklusion niedrig ist.

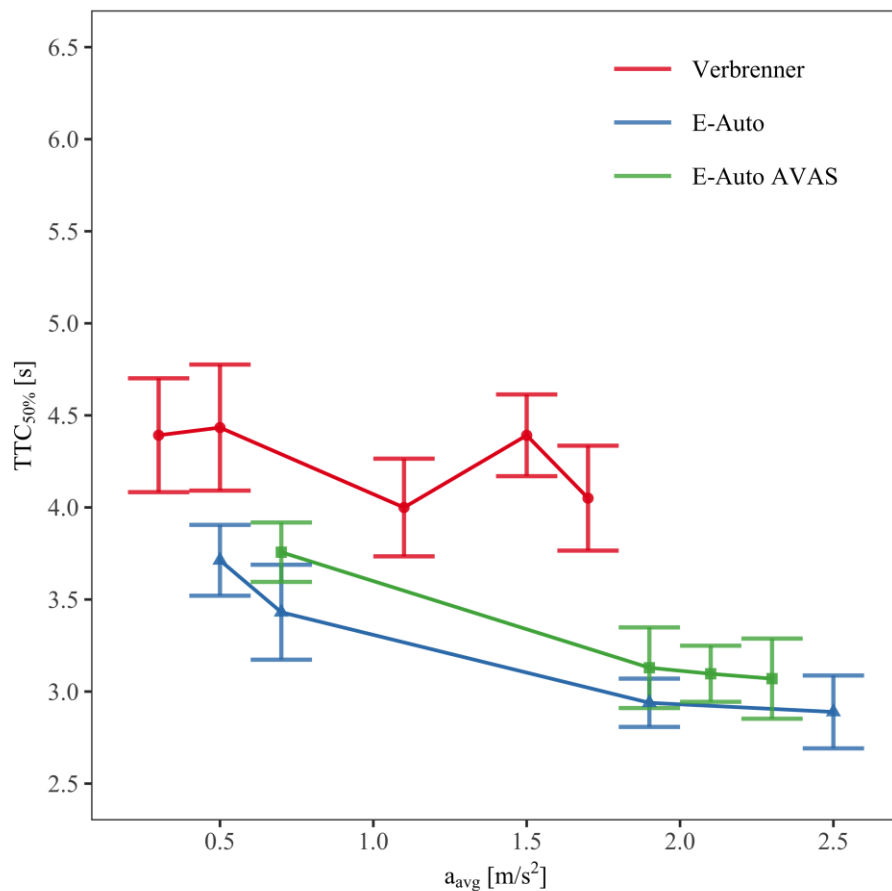


Abbildung 17: Mittlere akzeptierte TTC bei den Beschleunigungsfahrten in Experiment 2 als Funktion der Beschleunigung a_{avg} und des Fahrzeugtyps. Rot: Verbrenner. Blau: E-Auto ohne AVAS. Grün: E-Auto mit AVAS. Die Fehlerbalken zeigen ± 1 Standardfehler des Mittelwerts. Binweite = 0.2 m/s^2 .

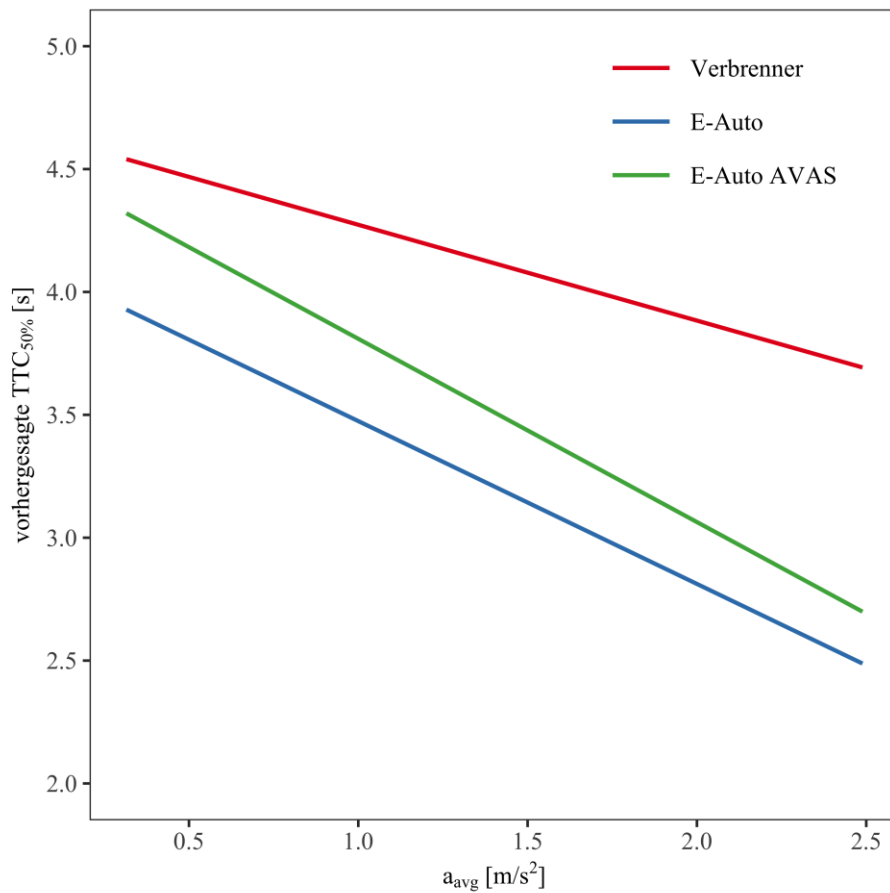


Abbildung 18: Vorhergesagte mittlere $TTC_{50\%}$ bei den Beschleunigungsfahrten in Experiment 2 als Funktion der Beschleunigung a_{avg} und des Fahrzeugtyps. Rot: Verbrenner. Blau: E-Auto ohne AVAS. Grün: E-Auto mit AVAS. Für die Modellvorhersage wurde eine Okklusionsgeschwindigkeit v_{occ} von 30 km/h angenommen.

Wie auch bei der Analyse der Konstantfahrten wurde das Kollisionsrisiko durch die Berechnung der Wahrscheinlichkeit einer riskanten Straßenüberquerungsentscheidung, die zu einer Kollision zwischen Fußgänger:in und Fahrzeug führen würde, genauer quantifiziert (Abbildung 19).

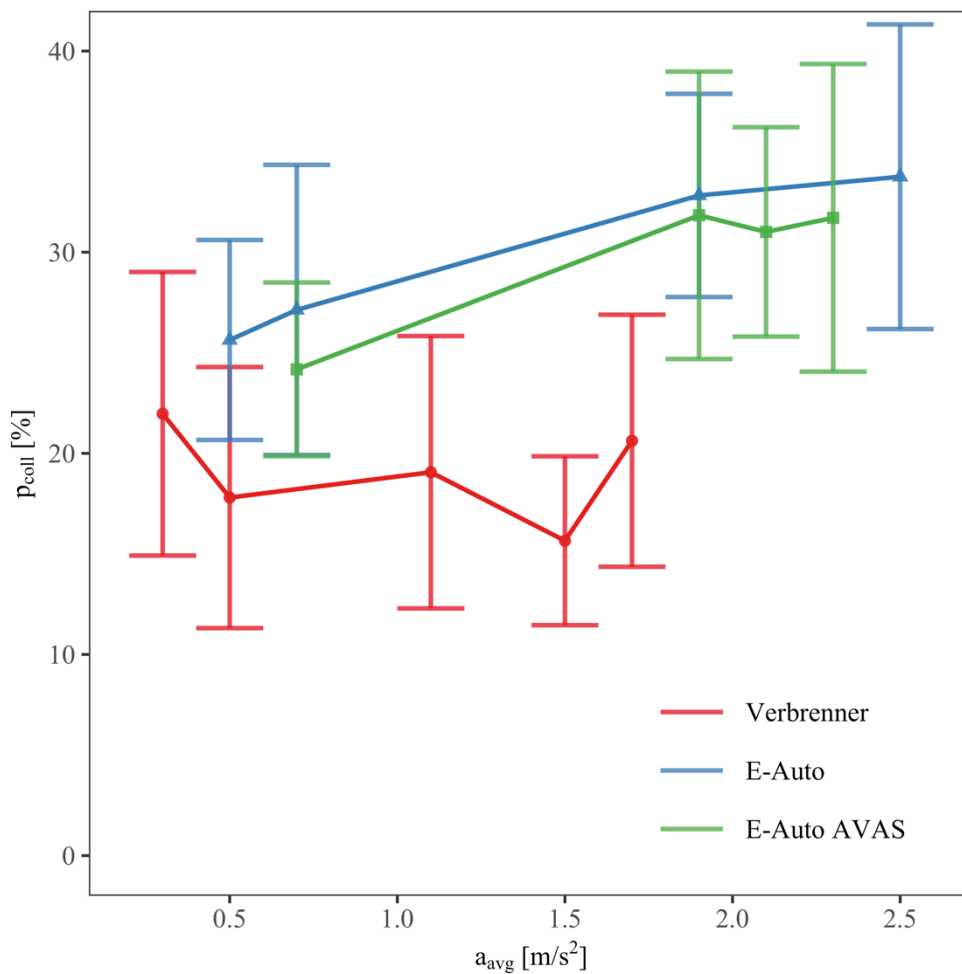


Abbildung 19: Mittlere Kollisionswahrscheinlichkeit (Wahrscheinlichkeit einer positiven Straßenüberquerungsentscheidung, wenn die TTC bei Okklusion kürzer als die individuelle mittlere Überquerungszeit der Straße war) als Funktion der Beschleunigung a_{avg} und des Fahrzeugtyps. Rot: Verbrenner. Blau: E-Auto ohne AVAS. Grün: E-Auto mit AVAS. Die Fehlerbalken zeigen ± 1 Standardfehler des Mittelwerts.

In Anlehnung an die Analyse der $TTC_{50\%}$ wurde in einem Kreuzvalidierungsverfahren jenes Regressionsmodell ermittelt, das die Kollisionswahrscheinlichkeit p_{coll} mit dem niedrigsten Vorhersagefehler PRESS und am sparsamsten vorhersagen kann. Folgendes Modell wurde ausgewählt (PRESS = 0.58):

$$p_{coll} \sim \text{Fahrzeugtyp} \times a_{avg} + (1|vp).$$

Das ausgewählte Regressionsmodell wurde wie das Modell zur Vorhersage der $TTC_{50\%}$ implementiert (siehe Anfang Abschnitt 4.2.2). Es erklärte mit seinen random und fixed effects 90.41 % der Varianz der Daten. Die

Varianzaufklärung durch die fixed effects betrug $R^2_{\text{marginal}} = 0.02$. In Tabelle 7 sind die geschätzten fixed effects des LMM dargestellt.

Tabelle 7: Experiment 2. Geschätzte fixed-effects Parameter des Modells zur Vorhersage der Kollisionswahrscheinlichkeit für die Beschleunigungsfahrten. Dargestellt sind die geschätzten Parameter (β), Standardfehler (SE), Freiheitsgrade (df), t- und p-Werte.

	β	SE	df	t	p
(Intercept)	0.21	0.06	25.10	3.17	.004
Verbrenner \times a_{avg}	-0.02	0.01	431.01	-1.72	.085
E-Auto \times a_{avg}	0.06	0.01	431.01	6.71	< .001
E-Auto AVAS \times a_{avg}	0.04	0.01	431.01	5.07	< .001

Ein Typ-3 Test zeigte eine signifikante Interaktion von Fahrzeugtyp und Beschleunigung ($F(3,431.02) = 35.23$, $p < .001$). Wie in Abbildung 19 dargestellt, lag die mittlere Kollisionswahrscheinlichkeit für den Verbrenner im Durchschnitt ebenfalls unter 20 % und somit auf einem ähnlichen Niveau wie bei den Konstantfahrten. In der Interaktion zwischen Fußgänger:in und Verbrenner stieg die Wahrscheinlichkeit einer riskanten Überquerungsentscheidung der Versuchspersonen durch die Beschleunigung nicht signifikant an (siehe Tabelle 7). Dahingegen war die Kollisionswahrscheinlichkeit bei allen Beschleunigungswerten für die E-Autos höher als für den Verbrenner und stieg, anders als für den Verbrenner, signifikant mit der Beschleunigung an (siehe Tabelle 7). Wie bereits in der Analyse von $TTC_{50\%}$ deutlich wurde, war die Erhöhung der Kollisionswahrscheinlichkeit für das E-Auto mit AVAS etwas geringer als für das E-Auto ohne AVAS, lag jedoch stets deutlich über der Wahrscheinlichkeit einer zur Kollision führenden Straßenüberquerungsentscheidung beim Verbrenner und stieg ebenfalls mit der Beschleunigung an (siehe Tabelle 7). Insgesamt stieg für das E-Fahrzeug mit und ohne AVAS die Kollisionswahrscheinlichkeit mit steigender Beschleunigung, während sie für den Verbrenner ungefähr auf einem Level blieb.

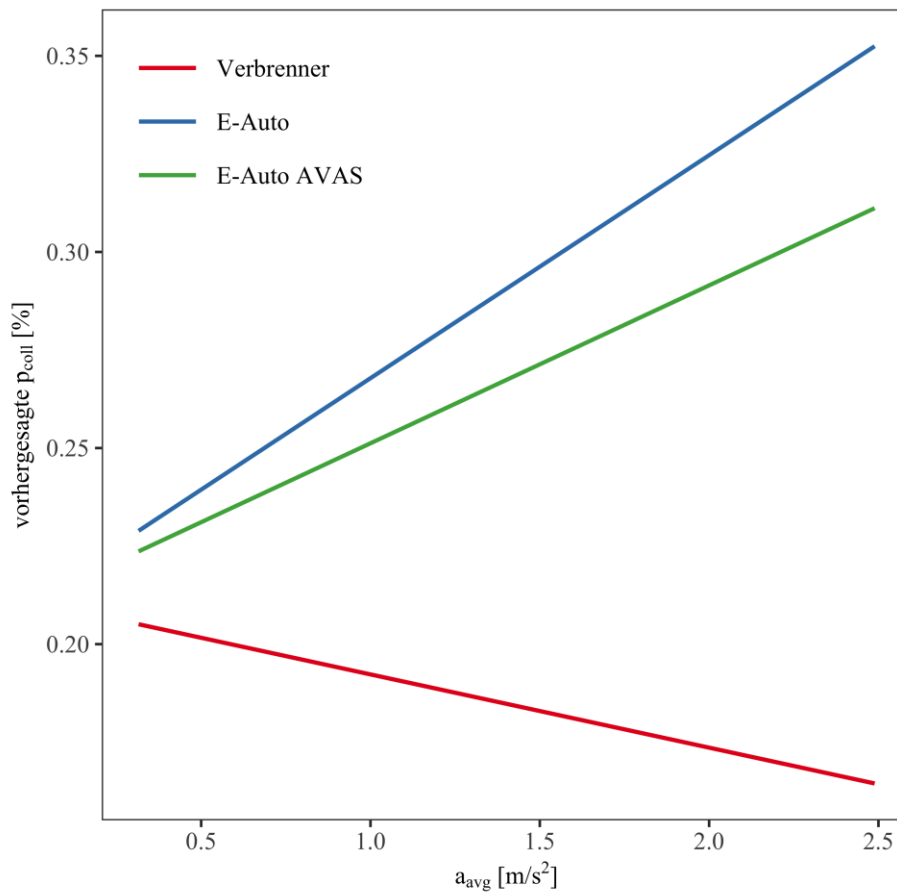


Abbildung 20: Vorhergesagte mittlere Kollisionswahrscheinlichkeit bei den Beschleunigungsfahrten in Experiment 2 als Funktion der Beschleunigung a_{avg} und des Fahrzeugtyps. Rot: Verbrenner. Blau: E-Auto ohne AVAS. Grün: E-Auto mit AVAS.

4.2.3 Zusammenfassung der Ergebnisse von Experiment 2

Wie zu erwarten war, zeigten die Straßenüberquerungsentscheidungen in Experiment 2 überwiegend ein ähnliches Muster wie die TTC-Schätzungen in Experiment 1. Bei konstanter Geschwindigkeit waren die Unterschiede zwischen Verbrenner und den E-Fahrzeugen insgesamt eher gering. Anders als in Experiment 1 gab es jedoch bei höheren Geschwindigkeiten einen signifikanten Effekt des Fahrzeugtyps. Für das E-Auto ohne AVAS wurden kürzere TTCs bei der Straßenüberquerung akzeptiert als für den Verbrenner. In der Interaktion mit dem E-Auto ohne AVAS zeigte sich also bei konstanter Geschwindigkeit eine Tendenz zu einem riskanteren Überquerungsverhalten, wobei jedoch die Wahrscheinlichkeit einer riskanten (d.h., zur Kollision führenden) Überquerungsentscheidung gegenüber dem Verbrenner nur um wenige Prozentpunkte erhöht war.

Bei Beschleunigung zeigten sich wie erwartet für das E-Auto mit und ohne AVAS signifikant kürzere akzeptierte TTCs und somit riskantere Überquerungsentscheidungen als für den Verbrenner. Dies ist kompatibel mit der in Experiment 1 gefundenen stärkeren Überschätzung der TTC für die E-Fahrzeuge bei Beschleunigung. Die vom Regressionsmodell vorhergesagten Werte von $TTC_{50\%}$ zeigen, dass auch bei hohen Beschleunigungen für den Verbrenner längere akzeptierte TTCs, also weniger riskante Überquerungsentscheidungen, zu erwarten sind als für die E-Fahrzeuge (Abbildung 18). Die Wahrscheinlichkeit einer riskanten Überquerungsentscheidung, die zur Kollision zwischen Fahrzeug und Fußgänger:in führen würde, wenn das Fahrzeug nicht durch Bremsen reagieren würde, lag bei hohen Beschleunigungswerten mehr als 10% über der Kollisionswahrscheinlichkeit in Interaktion mit dem Verbrenner. Dabei reduzierte das AVAS den Unterschied zwischen E-Fahrzeug und Verbrenner etwas, die Kollisionswahrscheinlichkeit lag aber auch für das E-Auto mit AVAS signifikant über dem Wert für den Verbrenner.

Die in Experiment 2 untersuchten Straßenüberquerungsentscheidungen bestätigen also die Schlussfolgerung aus den TTC-Schätzungen in Experiment 1. Im Fall von beschleunigten Heranfahrten stellt die im Gegensatz zu Verbrennern geänderte akustische Signatur von E-Fahrzeugen ein mögliches Risiko für Fußgänger:innen bei einer Straßenüberquerung dar.

5 Experiment 3: Detektion von Beschleunigung

Die TTC-Schätzungen in Experiment 1 und die Straßenüberquerungsentscheidungen in Experiment 2 zeigen, dass die Versuchsteilnehmer:innen die Beschleunigung der Fahrzeuge oft nicht adäquat berücksichtigten und dass dieser Effekt für die E-Fahrzeuge ausgeprägter war als für das Fahrzeug mit Verbrennungsmotor. Eine mögliche Erklärung für eine mangelnde Berücksichtigung der Beschleunigung wäre, dass von den Fußgänger:innen nur selten erkannt wird, dass das Fahrzeug tatsächlich beschleunigt. In einem solchen Fall wäre nachvollziehbar, dass die Versuchsteilnehmer:innen ihre TTC-Schätzungen so treffen, als fahre das Fahrzeug mit einer konstanten Geschwindigkeit auf sie zu (TTC-Schätzung erster Ordnung). Um einen Einblick zu erhalten, wie gut der Fahrzustand der Beschleunigung für die unterschiedlichen Fahrzeugtypen und Fahrprofile erkannt werden kann, wurde im abschließenden Experiment 3 die Detektion von Beschleunigung als mögliche Erklärung untersucht. Dabei war neben der Frage der Unterschiede zwischen den Fahrzeugtypen, eine weitere zentrale Frage, in welchem Ausmaß die durch die Fahrzeuggeräusche verfügbare akustische

Information die Beschleunigungsdetektion verbessert und welche Rolle das AVAS potenziell spielt.

5.1 Methode

5.1.1 Aufgabe und Versuchsdesign

Die Genauigkeit der Beschleunigungsdetektion wurde in einer Zwei-Intervall Aufgabe gemessen. In jedem Trial wurden nacheinander zwei heranfahrende Fahrzeuge präsentiert. Jedes der Fahrzeuge war für 3 s sichtbar, zwischen den beiden Fahrzeugen gab es ein Interstimulusintervall von 1 s. Eines der Fahrzeuge beschleunigte, das andere fuhr mit konstanter Geschwindigkeit. In jedem Trial wurde zufällig festgelegt, ob das erste oder das zweite Fahrzeug beschleunigte. Die Aufgabe der Versuchspersonen war, zu entscheiden, ob das erste oder das zweite Fahrzeug beschleunigt hatte. Die Antwort erfolgte nach Präsentation des zweiten Fahrzeuges durch die Betätigung einer von zwei Controllertasten. Die beschleunigenden Fahrzeuge wurden jeweils 3.0 s ab Einsetzen der Beschleunigung präsentiert. Es wurde also das Zeitintervall zwischen t_{accOnset} und $t_{\text{accOnset}} + 3.0$ s dargeboten (siehe Abbildung 7). Für die mit konstanter Geschwindigkeit fahrende Fahrzeuge wurde ebenfalls ein Zeitintervall von 3.0 s präsentiert, welches wie in Experiment 2 zufällig aus der jeweils zur Verfügung stehenden Aufnahmedauer ausgewählt wurde.

Es wurde dieselbe Verkehrsszene (zweistreifige Straße) wie in Experiment 1 und dasselbe visuelle Automodell wie in beiden vorherigen Experimenten verwendet. Auch die Simulation und Darbietung der akustischen und optischen Stimuli war identisch zu Experiment 1 und 2.

Tabelle 8 zeigt die im Experiment 3 präsentierten Beschleunigungsfahrten aufgeteilt nach Fahrprofil und Fahrzeugtyp. Es wurden jeweils zwei Aufnahmen in jeder Kombination aus Fahrzeug, Beschleunigung und Ausgangsgeschwindigkeit präsentiert.

Tabelle 8: Anzahl der im Experimente 3 verwendeten akustischen Aufnahmen der Beschleunigungsfahrten, aufgeteilt nach Geschwindigkeitsprofil und Fahrzeugtyp.

Geschwindigkeitsprofil		Fahrzeugtyp		
a [m/s ²]	v_0 [km/h]	Verbrenner	E-Auto	E-Auto mit AVAS
0.6	10	2	2	2
2.0	10	2	2	2
2.0	30	2	2	

Um die Genauigkeit der Beschleunigungsdetektion valide zu messen war entscheidend, dass korrekte Erkennen einer Beschleunigung nicht aufgrund anderer, gar nicht mit der Detektion von Beschleunigung zusammenhängender Reizmerkmale möglich war. Um den Einfluss solcher "unerwünschter Hinweisreize" zu minimieren, wurde zum Einen jede der in Tabelle 8 aufgelisteten Beschleunigungsfahrten mit exakt denselben 14 verschiedenen Konstantfahrten (Tabelle 9) kombiniert. Unterschiede in der Detektionsgenauigkeit zwischen verschiedenen beschleunigenden Fahrten können somit nicht durch unterschiedliche Konstantfahrten im Vergleichsintervall entstanden sein.

Tabelle 9: Anzahl der im Experimente 3 verwendeten akustischen Aufnahmen der Konstantfahrten, aufgeteilt nach Geschwindigkeit und Fahrzeugtyp.

Geschwindigkeit	Fahrzeugtyp		
v_{avg} [km/h]	Verbrenner	E-Auto	E-Auto mit AVAS
10			2
20	1	1	2
30	1	1	
40	1	1	
50	1	1	
60	1	1	

Außerdem wurde die finale Distanz (simulierte Distanz zwischen Fahrzeug und Versuchsperson am Ende der Darbietungsdauer) in jedem Trial und für jedes der zwei pro Trial präsentierten Fahrzeuge unabhängig voneinander

aus einer Zufallsverteilung gezogen (Gleichverteilung mit Minimum = 20 m und Maximum = 60 m). Die daraus resultierende Variation im Schallpegel, der visuellen Größe und der Entfernung am Ende der Darbietungsdauer war notwendig, um auf diesen Hinweisreizen basierende Strategien zur Erkennung des beschleunigenden Fahrzeugs deutlich zu erschweren.

Um zu untersuchen, in welchem Ausmaß die akustische Information (Fahrzeuggeräusche) die Genauigkeit der Beschleunigungsdetektion beeinflusst, gab es zwei Modalitätsbedingungen. In der rein visuellen Bedingung (V) war das Fahrzeug sichtbar, aber nicht hörbar. In der audiovisuellen Bedingung (AV) war das Fahrzeug sowohl sichtbar als auch hörbar.

Pro Modalitätsbedingung wurde jede Kombination aus beschleunigendem Fahrzeug (Tabelle 8) und mit konstanter Geschwindigkeit fahrendem Fahrzeug (Tabelle 9) jeder Versuchsperson vier Mal präsentiert. Die Reihenfolge der Trials war randomisiert, die Modalitätsbedingung, das beschleunigende Fahrzeug und das mit konstanter Geschwindigkeit fahrende Fahrzeug konnte sich also von Trial zu Trial ändern. Insgesamt wurden jeder Versuchsperson 896 Trials präsentiert. Das Experiment war in zwei Versuchssitzungen mit einer Dauer von ca. 2 bzw. 3 Stunden aufgeteilt.

5.1.2 Stichprobe

Es nahmen 14 Versuchspersonen an Experiment 3 teil. Alle Versuchspersonen erfüllten die Kriterien zur Seh- bzw. Hörfähigkeit (dieselben Kriterien wie in Experiment 1 und 2, siehe Abschnitt 3.1.5) und durchliefen das gesamte Experiment. Fünf der Versuchspersonen waren männlich, neun weiblich. Im Mittel waren die Versuchspersonen 24.43 Jahre alt ($SD = 4.29$ Jahre).

5.2 Ergebnisse und Diskussion

Für jedes beschleunigende Fahrzeug wurde in jeder der beiden Modalitätsbedingungen (V und AV) pro Versuchsperson der Anteil der korrekten Antworten (p_{corr}) aus den Daten berechnet. Dieser Anteil der korrekten Antworten entspricht in unserem Design der Trefferrate (hit rate), also dem Anteil an Trials, in dem die Versuchsperson das beschleunigende Fahrzeug (und nicht das mit konstanter Geschwindigkeit fahrende Fahrzeug) als beschleunigend wahrnahm. Abbildung 21 zeigt den mittleren Anteil korrekter Antworten für jede im Experiment präsentierte Kombination aus Fahrzeugtyp, Beschleunigungswert, Ausgangsgeschwindigkeit und Modalitätsbedingung. Ein Anteil an korrekten Antworten von $p_{corr} = 1.0$

(obere horizontale Linie in Abbildung 21) entspricht einer perfekten Genauigkeit der Beschleunigungsdetektion, bei der also das beschleunigende Fahrzeug stets korrekt identifiziert wird. In der hier verwendeten Zwei-Intervallaufgabe liegt die Ratewahrscheinlichkeit bei 0.5. Auch wenn eine Versuchsperson die Beschleunigung nicht wahrnehmen könnte, könnte sie durch Raten eine Antwortgüte von $p_{\text{Corr}} = 0.5$ erreichen (untere horizontale Linie in Abbildung 21), da nur zwei Antwortalternativen zur Auswahl stehen.

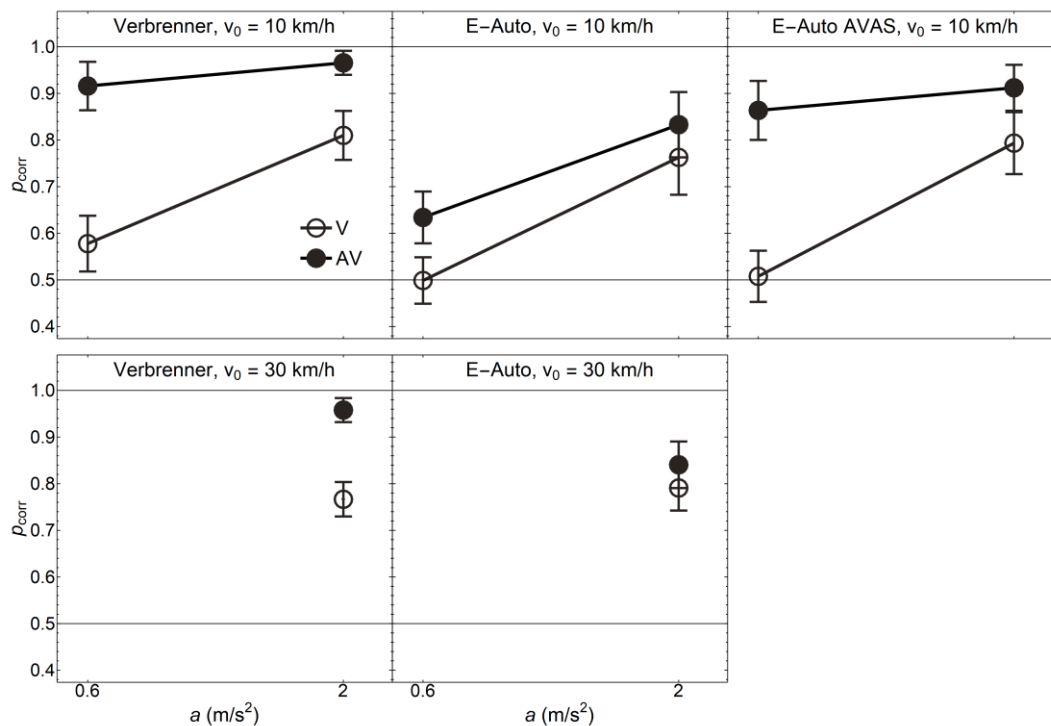


Abbildung 21: Experiment 3. Mittlerer Anteil an korrekten Antworten (p_{corr}) in der Beschleunigungsdetektionsaufgabe als Funktion der Beschleunigung. Obere Reihe: $v_0 = 10 \text{ km/h}$. Untere Reihe: $v_0 = 30 \text{ km/h}$. Linke Spalte: Verbrenner. Mittlere Spalte: E-Auto ohne AVAS. Rechte Spalte: E-Auto mit AVAS. Offene Symbole: rein visuelle Darbietung (V; ohne Sound). Ausgefüllte Symbole: audiovisuelle Darbietung (AV; mit Sound). Fehlerbalken: 95%-Konfidenzintervalle. Die untere horizontale Linie ($p_{\text{corr}} = 0.5$) repräsentiert die Ratewahrscheinlichkeit.

Wie Abbildung 21 zeigt, lag die Detektionsgenauigkeit für die niedrigere Beschleunigung (0.6 m/s^2) in der rein visuellen Bedingung (V; offene Symbole in Abbildung 21) für den Verbrenner nahe an der Ratewahrscheinlichkeit. Für das E-Fahrzeug mit und ohne AVAS unterschied sie sich sogar nicht signifikant von der Ratewahrscheinlichkeit, wie die Konfidenzintervalle in Abbildung 21 zeigen. Die zusätzliche auditive Information durch die Darbietung der Fahrzeuggeräusche (AV; gefüllte

Symbole in Abbildung 21) hatte bei der niedrigeren Beschleunigung sowohl für den Verbrenner und als auch für das E-Auto mit AVAS einen starken positiven Effekt. Der Anteil korrekter Antworten erhöhte sich auf etwas über bzw. knapp 90 %. Die Präsentation auditiver Information der (niedrigeren) Beschleunigung des Verbrenners und des E-Autos mit AVAS verbesserte demnach die Detektionsgenauigkeit. Beim E-Auto ohne AVAS stieg p_{Corr} durch die zusätzliche auditive Information ebenfalls an, jedoch nur auf etwas über 60 %. Somit war für das E-Auto ohne AVAS die Detektionsgenauigkeit auch in der audiovisuellen Bedingung geringer als für Verbrenner und E-Auto mit AVAS.

Bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von 10 km/h wurde die stärkere Beschleunigung (2.0 m/s^2) in der rein visuellen Bedingung überzufällig genau detektiert. Die Detektionsgenauigkeit lag bei maximal 80% (Verbrenner). Im Vergleich zur niedrigeren Beschleunigung wurde die höhere Beschleunigung also leichter anhand rein visueller Informationen detektiert. Wurden bei einer stärkeren Beschleunigung jedoch zusätzlich die Fahrzeuggeräusche präsentiert, so verbesserte sich wiederum die Detektionsgenauigkeit. Für den Verbrenner und das E- Fahrzeug war, wie auch schon bei der leichteren Beschleunigung beobachtet, diese Verbesserung stärker ausgeprägt als für das E-Fahrzeug ohne AVAS. Demnach wurde eine (stärkere) Beschleunigung, die rein visuell schon relativ gut zu detektieren war, deutlich besser erkannt, wenn bei Verbrenner oder E-Fahrzeug mit AVAS simultan die akustische Signatur Beschleunigungsinformation lieferte.

Ein ähnliches Muster zeigte sich bei einem Fahrprofil mit stärkerer Beschleunigung und einer Ausgangsgeschwindigkeit von 30 km/h (untere Zeile in Abbildung 21). Somit hatte die zusätzliche Darbietung der Fahrzeuggeräusche bei beiden Ausgangsgeschwindigkeiten einen positiven und vergleichbar großen Effekt auf p_{Corr} . Wie bei der niedrigeren Ausgangsgeschwindigkeit war dieser Effekt jedoch für den Verbrenner deutlich stärker ausgeprägt als für das E-Auto ohne AVAS.

Der Anteil korrekter Antworten (p_{corr}) wurde mittels Messwiederholungs-Varianzanalysen (rmANOVAs) mit univariatem Ansatz und Huynh-Feldt Freiheitsgradkorrektur in zwei Schritten statistisch analysiert. Zunächst wurden Haupt- und Interaktionseffekte der Faktoren Modalität, Fahrzeugtyp und Beschleunigungsstärke für die Fahrten mit einer Ausgangsgeschwindigkeit von 10 km/h untersucht. Im zweiten Schritt wurden Haupt- und Interaktionseffekte der Faktoren Modalität, Fahrzeugtyp und Ausgangsgeschwindigkeit für die Versuchsbedingungen mit $a = 2.0 \text{ m/s}^2$ statistisch getestet.

Bei der Ausgangsgeschwindigkeit von 10 km/h waren alle Haupt- und Interaktionseffekte signifikant (siehe

Tabelle 10). Dabei sind vor allem jene Effekte zentral, bei denen die Modalität involviert ist. Der Haupteffekt Modalität bestätigt, dass sich die mittlere Detektionsleistung gegenüber der rein visuellen Präsentation verbesserte, wenn zusätzlich das Fahrzeuggeräusch präsentiert wurde (AV) und eine akustische Information über den Beschleunigungszustand lieferte. Es bestätigte sich ebenfalls, dass der positive Effekt von zusätzlicher auditiver Information auf die Detektionsleistung für Verbrenner und E-Auto mit AVAS stärker war als für das E-Auto ohne AVAS (Interaktion Fahrzeugtyp \times Modalitätsbedingung) bzw. bei der niedrigen Beschleunigung stärker war als bei der hohen Beschleunigung (Interaktion Beschleunigung \times Modalitätsbedingung).

Für ein besseres Verständnis des Effekts der zusätzlichen akustischen Information in Interaktion mit Beschleunigung und Fahrzeugtyp wurden separate rmANOVAs für die niedrigere und die höhere Beschleunigung bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von 10 km/h angeschlossen. Für Fahrten mit *niedrigerer Beschleunigung* ($a = 0.6 \text{ m/s}^2$ und $v_0 = 10 \text{ km/h}$) war die Detektionsleistung mit der zusätzlichen akustischen Information im Mittel deutlich besser ($F(1, 13) = 116.23$, $p < .001$, $\eta^2_p = .90$) wobei sich das Ausmaß der Verbesserung zwischen den Fahrzeugtypen unterschied (Interaktion von Fahrzeugtyp und Modalitätsbedingung) ($F(2, 26) = 40.24$, $p < .001$, $\epsilon = 1.0$, $\eta^2_p = .76$). Weitere post-hoc Tests bei $a = 0.6 \text{ m/s}^2$ und $v_0 = 10 \text{ km/h}$ zeigten einen signifikanten Anstieg der Detektionsleistung durch die zusätzliche akustische Information für alle drei Fahrzeugtypen (t -Tests für gepaarte Stichproben, alle p -Werte $< .001$) und signifikante Unterschiede im Effekt der akustischen Information zwischen Verbrenner und E-Auto ohne AVAS sowie zwischen E-Auto ohne AVAS und E-Auto mit AVAS (rmANOVAs, beide p -Werte $< .001$), jedoch nicht zwischen Verbrenner und E-Auto mit AVAS ($p = .57$). Ein nahezu identisches Muster an statistischen Testergebnissen zeigte sich auch für Fahrten mit *höherer Beschleunigung* (2.0 m/s^2 und $v_0 = 10 \text{ km/h}$). Der einzige Unterschied war, dass der Anstieg der Detektionsleistung durch die zusätzliche akustische Information sich nicht signifikant zwischen E-Auto mit und ohne AVAS unterschied. Es wird also deutlich, dass die akustische Signatur des Verbrenners bei Beschleunigung die Detektionsleistung im Vergleich zum E-Auto ohne AVAS erhöhte, bei beiden Beschleunigungsstärken. Das AVAS des E-Fahrzeuges wirkte sich vor allem bei niedrigerer Beschleunigung positiv auf die Detektionsleistung aus.

Tabelle 10: Experiment 3. Ergebnisse der rmANOVA für die Antwortgüte (Anteil korrekter Antworten, p_{corr}) bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von 10 km/h. Es werden die unkorrigierten Zähler- und Nennerfreiheitsgrade, der Huynh-Feldt-Korrekturfaktor ϵ , F - und p -Werte sowie das partielle η^2 für die Haupt- und Interaktionseffekte der Faktoren Modalität (A, AV), Beschleunigung (a) und Fahrzeugtyp (Verbrenner, E-Auto ohne AVAS, E-Auto mit AVAS) berichtet.

	df_{Num}	df_{Den}	ϵ	F	p	η^2_p
Modalität	1	13		93.02	< .001	.88
a	1	13		71.96	< .001	.85
Modalität × a	1	13		46.95	< .001	.78
Fahrzeugtyp	2	26	0.98	76.20	< .001	.85
Modalität × Fahrzeugtyp	2	26	0.90	35.91	< .001	.73
Fahrzeugtyp × a	2	26	1.10	6.34	.006	.33
Modalität × Fahrzeugtyp × a	2	26	1.07	10.64	< .001	.45

Im zweiten Schritt der Analyse zeigte die rmANOVA für Fahrten mit *höherer Beschleunigung* (2.0 m/s^2) über die beiden Ausgangsgeschwindigkeiten $v_0 = 10$ und 30 km/h für Verbrenner und E-Fahrzeug ohne AVAS weder einen signifikanten Effekt der Ausgangsgeschwindigkeit noch signifikante Interaktionen, die die Ausgangsgeschwindigkeit beinhalteten (alle p -Werte $> .063$, siehe Tabelle 11). Dies bestätigt, dass bei der hohen Beschleunigung die Ausgangsgeschwindigkeit keinen substantiellen Effekt auf die oben beschriebenen Unterschiede zwischen Verbrenner und E-Auto ohne AVAS bzw. zwischen der rein visuellen und audiovisuellen Bedingung hatte.

Tabelle 11: Experiment 3, Beschleunigungsdetektion. Ergebnisse der rmANOVA von p_{corr} bei einer Beschleunigung von 2.0 m/s^2 . Es werden Zähler- und Nennerfreiheitsgrade, F - und p -Werte sowie das partielle η^2 für die Haupt- und Interaktionseffekte der Faktoren Modalität, Ausgangsgeschwindigkeit (v_0) und Fahrzeugtyp berichtet.

	df_{Num}	df_{Den}	F	p	η^2_p
Modalität	1	13	96.75	<.001	.31
Fahrzeugtyp	1	13	25.21	<.001	.13
v_0	1	13	0.07	.793	.00
Modalität × Fahrzeugtyp	1	13	20.56	.001	.10
Modalität × v_0	1	13	0.10	.761	.00
Fahrzeugtyp × v_0	1	13	2.24	.158	.02
Modalität × Fahrzeugtyp × v_0	1	13	4.13	.063	.01

5.3 Zusammenfassung der Ergebnisse von Experiment 3

Experiment 3 untersuchte, ob die in Experiment 1 und 2 gefundene Überschätzung der TTC und die riskanteren Straßenüberquerungsentscheidungen bei E-Fahrzeugen durch Schwierigkeiten bei der Beschleunigungsdetektion erklärt werden können. Es wurde vermutet, dass eine Beschleunigung anhand der Fahrzeuggeräusche des Verbrenners besser detektiert werden kann als bei einem E-Fahrzeug und dass generell die Detektion deutlich leichter ist, wenn zusätzlich zur visuellen Information die Fahrzeuggeräusche präsentiert werden. Um die Rolle der akustischen Information zusätzlich zur visuellen Information bei beschleunigten Heranfaharten zu untersuchen, wurden audiovisuelle sowie rein visuelle Heranfaharten präsentiert. Es zeigte sich, dass es für die Versuchspersonen sehr schwierig war, eine leichte Beschleunigung ausschließlich anhand visueller Informationen zu erkennen. Auch wenn die Detektionsleistung in der rein visuellen Bedingung bei einer stärkeren Beschleunigung vergleichsweise anstieg, so zeigten sich weiterhin Detektionsprobleme. Durch die zusätzliche Präsentation der Fahrzeuggeräusche verbesserte sich Detektionsleistung insgesamt sehr deutlich und statistisch signifikant. Das bedeutet, dass die akustische Signatur eines beschleunigenden Fahrzeuges einen hohen Stellenwert für die erfolgreiche Erkennung des dynamischen Fahrprofils hat.

Die Detektionsleistung für die Beschleunigung der verschiedenen Fahrzeugtypen profitierte allerdings nicht gleichermaßen von der zusätzlichen auditiven Information. Während die akustische Signatur eines stark beschleunigenden Verbrenners zu einer Detektionsleistung von ca. 95 % verhalf, so zeigte sich für das E-Fahrzeug ohne AVAS eine maximale Detektionsleistung von ca. 85 % bei starker Beschleunigung. Dieser Unterschied zeigte sich sowohl für eine geringere als auch eine höhere Ausgangsgeschwindigkeit. Bei leichter – d.h. akustisch weniger prominenterer – Beschleunigung war der Unterschied noch deutlicher: Die Detektionsleistung für die Beschleunigung eines E-Fahrzeuges ohne AVAS erreichte nur knapp 65 %. Dahingegen lag die Detektionsleistung für die Beschleunigung eines Verbrenners bei ca. 90 %. Demnach stellt die geänderte akustische Signatur des E-Fahrzeuges ohne AVAS, insbesondere bei geringer Beschleunigung, eine mögliche Schwierigkeit für Fußgänger:innen dar, die vorliegende Beschleunigung zu erkennen.

Durch das AVAS verbesserte sich die Detektion einer Beschleunigung des E-Fahrzeuges signifikant im Vergleich zum E-Fahrzeug ohne AVAS. Das AVAS wirkte sich vor allem bei niedrigerer Beschleunigung – d.h. wenn die Beschleunigung des E-Fahrzeuges besonders schlecht detektiert wurde –

positiv auf die Erkennungsleistung aus. Auch wenn die Detektionsleistung für eine Beschleunigung des E-Fahrzeuges mit AVAS nicht ganz die des Verbrenners erreichte, so lässt sich dennoch schlussfolgern, dass das AVAS mögliche Schwierigkeiten für Fußgänger:innen eine Beschleunigung eines E-Fahrzeuges zu erkennen, abmildern könnte.

Die deutliche niedrigere Detektionsleistung für eine Beschleunigung des E-Fahrzeugs ohne AVAS im Vergleich zum Verbrenner in der audiovisuellen Bedingung (Abbildung 21) ist kompatibel mit der mit zunehmender Beschleunigung deutlich zunehmenden Überschätzung der TTC in Experiment 1 (Abbildung 13) und den im Vergleich zum Verbrenner riskanteren Straßenüberquerungsentscheidungen in Experiment 2 (Abbildung 19). Die letztgenannten Befunde könnten dadurch erklärt werden, dass die Versuchspersonen in einem gewissen Anteil der Versuchsdurchgänge gar nicht erkennen, dass das E-Fahrzeug ohne AVAS beschleunigt und insofern die TTC so schätzen, als würde das Fahrzeug mit konstanter Geschwindigkeit auf sie zufahren (Schätzung 1. Ordnung). Allerdings lag für das E-Auto mit AVAS die Genauigkeit der Beschleunigungsdetektion nicht wesentlich unter der für den Verbrenner (Abbildung 21), Trotzdem wurde die TTC des E-Autos mit AVAS mit zunehmender Beschleunigung im Vergleich zum Verbrenner überschätzt (Abbildung 13) und es wurden riskantere Straßenüberquerungsentscheidungen getroffen (Abbildung 19). Dies könnte darauf hinweisen, dass bei den E-Fahrzeugen die Einbeziehung der Beschleunigung in TTC-Schätzungen selbst dann im Vergleich zum Verbrenner erschwert ist, wenn die Beschleunigung wahrgenommen wird. Für eine abschließende Beantwortung der Frage, zu welchem Anteil die abweichenden TTC-Schätzungen und Straßenüberquerungsentscheidungen für die E-Fahrzeuge anhand der Detektionsgenauigkeit für die Beschleunigung erklärt werden können, wäre jedoch eine quantitative Modellierung notwendig, die über den Rahmen dieser Studie hinausgeht.

6 Diskussion

Die im Rahmen dieser Studie vorgenommene Entwicklung und Implementierung eines hochqualitativen audiovisuellen Simulationssystems ermöglichte die experimentelle Untersuchung des Verhaltens von Fußgänger:innen in realitätsnahen Verkehrsszenarien. Im Speziellen wurde die audiovisuelle Wahrnehmung von Fußgänger:innen in Situationen untersucht, in denen diese eine Straße überqueren möchten, während sich ein beschleunigendes Fahrzeug nähert. Mittels unseres Simulationssystems konnten wir zum ersten Mal realistische Fahrzeuggeräusche der verschiedenen Fahrzeugtypen in Fahrzuständen mit Beschleunigung darbieten, da wir vorab die Fahrzeuggeräusche realer Fahrzeuge aufnahmen und anschließend in die experimentelle Untersuchung einbinden konnten. Außerdem haben wir erstmalig das dynamische Schallfeld eines sich nähernden Fahrzeugs physikalisch korrekt simuliert und es räumlich so dargeboten, dass den Proband:innen alle auch in der realen Situation verfügbaren räumlichen Hinweisreize zur Verfügung standen. Mittels unseres Simulationssystems konnten wir somit die Wahrnehmung der Fahrzeugtypen Verbrenner, E-Fahrzeug ohne AVAS und E-Fahrzeug mit AVAS vergleichen und untersuchen, welchen Effekt die spezifischen akustischen Signaturen der E-Fahrzeuge haben. Die drei Experimente dieser Studie untersuchten erstmalig audiovisuelle TTC-Schätzungen und Straßenüberquerungsentscheidungen bei konstanter Geschwindigkeit und insbesondere bei Beschleunigung für alle drei Fahrzeugtypen, um potenziell riskante Verkehrsszenarien für Fußgänger:innen zu identifizieren.

In der Interaktion mit einem sich mit konstanter Geschwindigkeit nähernden Fahrzeug ergaben sich keine prominenten Unterschiede in den TTC-Schätzungen und Straßenüberquerungsentscheidungen für das E-Fahrzeug mit und ohne AVAS im Vergleich zum Verbrenner. Insgesamt war im Mittel eine leicht unterschätzte TTC zu beobachten, die dennoch recht nah am tatsächlichen TTC-Wert lag. In der Realität würde eine unterschätzte TTC in einer Straßenüberquerungssituation keine potenzielle Gefahr darstellen, da die Fußgänger:innen annehmen würden, dass sie das heranfahrende Fahrzeug früher erreichen würde, als es eigentlich der Fall wäre. Auf Basis einer unterschätzten TTC würde man vermuten, dass eine sicherere Überquerungsentscheidung getroffen werden würde. Tatsächlich bestätigte sich diese Vermutung in Experiment 2.

Bei positiv beschleunigten Heranfahrrten hingegen zeigte sich eine deutliche und mit der Beschleunigung zunehmende Überschätzung der TTC für die E-Fahrzeuge. Diese Überschätzung war beim Verbrenner signifikant

geringer ausgeprägt. Die TTC-Schätzungen für die E-Fahrzeuge lagen dabei teilweise näher an einer sogenannten Schätzung erster Ordnung als an der dargebotenen TTC. Bei der Schätzung erster Ordnung bleibt der Geschwindigkeitszuwachs während der beschleunigten Annäherung des Fahrzeugs unberücksichtigt (z. B. Benguigui, et al., 2003). Beim Verbrenner lagen die Schätzung dahingegen meist näher an einer Schätzung zweiter Ordnung, bei der die Beschleunigung berücksichtigt wird, und somit näher an der tatsächlich dargebotenen TTC. Das AVAS hatte hier einen positiven Effekt auf die Genauigkeit der TTC-Schätzungen für E-Fahrzeuge bei Beschleunigung. Mit aktiviertem AVAS lagen die Schätzungen für das E-Auto näher am tatsächlichen Wert als bei inaktivem AVAS. Somit reduzierte das AVAS die Überschätzung der TTC, die für das E-Fahrzeug ohne AVAS zu beobachten war, ohne jedoch die Genauigkeit der Schätzungen für den Verbrenner zu erreichen. Die mit der Beschleunigung zunehmende Überschätzung der TTC insbesondere für das E-Fahrzeug steht im Einklang mit Daten aus der Literatur, die für rein visuelle Darbietung der sich nähernden Objekte erhoben wurden (z. B. Kaiser & Hecht, 1995; Rosenbaum, 1975). Unsere Studie zeigt erstmalig, dass – wie erwartet – die akustische Information über den Fahrzustand, welche beim Verbrenner charakteristisch ist, die Schätzung der Kontaktzeit in einer Situation mit Beschleunigung deutlich verbessern kann. Zweitens bestätigen die Ergebnisse von Experiment 1 die Erwartung, dass diese Nutzung des Fahrzeuggeräuschs bei der TTC-Schätzung für E-Fahrzeuge nur eingeschränkt möglich ist. Die mittels der Regressionsmodelle vorhergesagten TTC-Schätzungen (Abbildung 12 und Abbildung 13) repräsentieren eine Situation, in der sich die Fahrzeuge mit exakt demselben Geschwindigkeitsprofil nähern. Die auf Basis der Versuchsdaten (Abbildung 11) vorhergesagten Unterschiede in den TTC-Schätzungen zwischen den Fahrzeugtypen können also eindeutig auf die Unterschiede in der akustischen Signatur zwischen Verbrenner und E-Auto mit und ohne AVAS zurückgeführt werden.

Das an die Versuchsdaten von Experiment 1 angepasste Regressionsmodell sagt vorher, dass eine tatsächliche TTC von 5 s bei einer Beschleunigung von 2.0 m/s^2 um ca. 1.5 s beim E-Auto ohne AVAS und ca. 1 s beim E-Auto mit AVAS überschätzt werden (Abbildung 13). Eine so deutlich überschätzte TTC würde in einer Straßenüberquerungssituation ein potenzielles Risiko für Fußgänger:innen darstellen, da sie annehmen würden, dass das Fahrzeug später an ihrer Position ankommen werde, als es tatsächlich der Fall wäre. Dass sich dieser Wahrnehmungsfehler auch im Überquerungsverhalten widerspiegelt, zeigte Experiment 2. Im Vergleich zum Verbrenner wurden für beschleunigte E-Fahrzeuge zeitlich „knappere“ und potenziell riskantere

Straßenüberquerungsentscheidungen getroffen. Bei der Überquerung einer Straße droht dann eine Kollision zwischen Fußgänger:in und Auto, wenn bei der Initiierung einer Straßenüberquerung die verbleibende Zeit bis zum Eintreffen des Autos an der Position der Fußgänger:in (TTC) kürzer als die zum Überqueren der Fahrbahn notwendige Zeit ist. In Experiment 2 lag die Wahrscheinlichkeit für eine solche Situation (also die Kollisionswahrscheinlichkeit) für die E-Fahrzeuge bei hoher Beschleunigung um bis zu 10% höher als für den Verbrenner (Abbildung 19). Zu Straßenüberquerungsentscheidungen bei positiv beschleunigten Heranfaharten gab es in der Literatur bislang keine Daten, erst recht nicht im Vergleich von E-Fahrzeugen und Verbrennern. Unsere Studie stellt also eine signifikante Erweiterung der Datenbasis zur Interaktion von Fußgänger:innen mit Fahrzeugen dar. Die in Experiment 2 gefundenen Muster in den Straßenüberquerungsentscheidungen sind kompatibel mit den in Experiment 1 erhobenen TTC-Schätzungen. In Situationen, in denen die TTC überschätzt wurde, wurden auch riskantere Überquerungsentscheidungen getroffen. Unterschieden sich die TTC-Schätzungen jedoch kaum zwischen den Fahrzeugtypen, wie im Fall der Konstantfaharten, so gab es auch keine systematischen Unterschiede in den Überquerungsentscheidungen.

Die Daten aus Experiment 3 zeigen, dass die Erkennung von Beschleunigung durch die Fahrzeuggeräusche deutlich erleichtert wird, im Vergleich zu einer Situation, in der lediglich visuelle Informationen zur Verfügung stehen (Abbildung 21). Die Proband:innen konnten jedoch die Fahrzeuggeräusche des E-Autos ohne AVAS schlechter für die Erkennung des Beschleunigungszustands nutzen als dies des Verbrenners bzw. des E-Autos mit AVAS. Die in Experiment 1 und 2 überschätzten TTCs und riskanteren Überquerungsentscheidungen könnten zumindest teilweise auf Schwierigkeiten bei der Detektion von Beschleunigung eines E-Fahrzeuges zurückgeführt werden. Die weniger genaue Erkennung der Beschleunigung beim E-Fahrzeug ohne AVAS im Vergleich zu Verbrenner und E-Fahrzeug mit AVAS ist qualitativ kompatibel mit der stärkeren TTC-Überschätzung (Experiment 1) und den riskanteren Überquerungsentscheidungen (Experiment 2) für das E-Auto ohne AVAS. Allerdings lag die Genauigkeit der Beschleunigungsdetektion für Verbrenner und E-Auto mit AVAS recht dicht beieinander, während die TTC-Schätzungen und Überquerungsentscheidungen signifikante Unterschiede zwischen diesen Fahrzeugtypen zeigten. Dies deutet möglicherweise darauf hin, dass eine bloße Erkennung von Beschleunigung noch nicht für eine akkurate Schätzung der TTC ausreicht. In diesem Sinne könnte das AVAS zwar eine Beschleunigungsdetektion auf dem Niveau des Verbrenners ermöglichen, jedoch weniger gut nutzbare Informationen über die Bewegung und TTC

des Fahrzeugs zur Verfügung stellen. Um diese Frage zu klären, wären weitere Experimente und eine quantitative Modellierung des Zusammenhangs zwischen Beschleunigungsdetektion und TTC-Schätzung erforderlich. Hier schließt sich zudem eine offene Forschungsfrage an. Könnte eine eindeutige Signalisierung des Zustands positiver Beschleunigung durch ein visuelles Signal die TTC-Schätzungen und Überquerungsentscheidungen auch für ein E-Auto signifikant verbessern? Visuelle Indikatoren für den Fahrzustand werden aktuell im Zusammenhang mit autonom fahrenden Fahrzeugen intensiv diskutiert (z. B. Y. M. Lee et al., 2019). Ob ein solch visueller Indikator einen positiven Effekt auf TTC-Schätzungen hat, wäre in weiteren Studien zu untersuchen.

In der Zusammenschau zeigen die Ergebnisse der drei Experimente, dass Fußgänger:innen die akustische Signatur eines Fahrzeuges nutzen, um seine Beschleunigung auf der Wahrnehmungs- und Verhaltensebene zu berücksichtigen. Die gegenüber einem konventionellen Verbrenner veränderte akustische Signatur eines E-Fahrzeuges erschwert die adäquate Berücksichtigung sowohl auf der Wahrnehmungs- als auch auf der Verhaltensebene. Die zusätzliche Sonifizierung des E-Fahrzeuges durch das AVAS verbesserte die Detektion einer Beschleunigung zwar, dennoch ist auf Grundlage der Befunde zur TTC-Schätzung und Überquerungsentscheidungen damit zu rechnen, dass auch die akustische Signatur eines E-Fahrzeuges mit AVAS nicht für eine adäquate Berücksichtigung der Beschleunigung für Fußgänger:innen hinreichend ist. Bevor praktische Implikationen aus den vorliegenden Befunden abgeleitet werden, werden im folgenden Kapitel zunächst Limitationen der Studie und offene Forschungsfragen diskutiert.

6.1 Limitationen der Studie und Forschungsperspektiven

Für die Generalisierbarkeit der Befunde für „den“ Verbrenner, „das“ E-Fahrzeug“ oder „das“ AVAS ist kritisch zu beleuchten, dass im vorliegenden Projekt jeweils nur ein spezifisches Modell eines Verbrenners, E-Fahrzeugs mit und E-Fahrzeugs ohne AVAS untersucht wurde. Unter der Annahme, dass unsere Wahrnehmung bzw. unser Verhalten sensibel auf akustische Signaturen der Fahrzeuge reagiert, wäre es denkbar, dass Unterschiede zwischen verschiedenen Fahrzeugmodellen innerhalb eines Fahrzeugtyps relevant sein könnten. Bereits Verbrenner können sich deutlich in ihrem Antriebsstrangeräusch unterscheiden, bedingt durch Unterschiede in der Motorisierung und im Sounddesign. Dies gilt in noch größerem Maße für Varianten eines AVAS. Hier wurden und werden von den Fahrzeugherstellern teilweise sehr unterschiedliche Klangkonzepte entwickelt, obwohl natürlich alle aktuellen Systeme den recht grob

formulierten Rahmenvorgaben von UNECE R138 folgen müssen. Für zukünftige Forschungsprojekte wäre es daher erstrebenswert weitere Modelle von Verbrennern und E-Fahrzeugen mit und ohne AVAS im Kontext von Fußgänger:innenverhalten zu untersuchen, um die ökologische Validität der Daten zu erhöhen.

Im Spannungsfeld zwischen ökologischer Validität und experimenteller Kontrolle stehen die in den Experimenten verwendeten Stimuli, die auf Aufnahmen realer Fahrzeuge in den relevanten Fahrsituationen basieren. Da für das vorliegende Projekt die unterschiedlichen akustischen Signaturen der Fahrzeugtypen zentral waren, ermöglichte unser auf akustischen Aufnahmen basierender Simulationsansatz unter diesem Aspekt die größtmögliche ökologische Validität. Auf der anderen Seite wichen die auf der Teststrecke gefahrenen Geschwindigkeitsprofile bei Beschleunigungsfahrten teilweise von den intendierten Profilen ab. Die tatsächlich gefahrene mittlere Beschleunigung unterschied sich in Teilen zwischen den Fahrzeugtypen. Außerdem waren in einigen Fahrbedingungen prinzipbedingt Schaltvorgänge beim Verbrenner notwendig, was hier zu weiteren Unterschieden in der Fahrdynamik führte (Abfall der Beschleunigung beim Einleiten des Schaltvorgangs, danach kurzfristig stärkere Beschleunigung). Die Unterschiede in den gefahrenen Geschwindigkeitsprofilen konnten wir in der Datenanalyse durch die verwendeten Regressionsmodelle berücksichtigen und somit Unterschiede in den TTC-Schätzungen und Straßenüberquerungsentscheidungen zwischen den Fahrzeugtypen unter statistischer Kontrolle der Geschwindigkeitsprofile identifizieren. Nichtsdestotrotz wäre eine höhere experimentelle Kontrolle der Geschwindigkeitsprofile bei gleichzeitiger Erhaltung der hohen ökologischen Validität natürlich der Königsweg. Dieser sollte in zukünftigen Experimenten angestrebt werden, um bei tatsächlich identischen Geschwindigkeitsprofilen die durch die unterschiedlichen akustischen Signaturen der Fahrzeugtypen bedingten Unterschiede in den TTC-Schätzungen und Straßenüberquerungsentscheidungen zu bestätigen.

Das in den Experimenten verwendete Szenario wurde mit einer realitätsnahen auditiven und visuellen Simulation erzeugt. Die auch im Vergleich zu früheren Studien relativ akkuraten TTC-Schätzungen für die Konstantfahrten in Experiment 1 bestätigen die hohe Qualität der in den Simulationen dargebotenen sensorischen Informationen. Dennoch befanden sich die Versuchspersonen in einer Laborsituation. Somit stellt sich – wie für alle in virtueller Realität durchgeführte Experimente - die Frage, ob sich die Versuchspersonen in einer realen Verkehrssituation genauso verhalten hätten. Auffällig ist in diesem Kontext die verhältnismäßig hohe Kollisionswahrscheinlichkeit bei den

Straßenüberquerungsentscheidungen in Experiment 2, die selbst bei den Konstantfahrten bei fast 20% lag. Wir gehen nicht davon aus, dass unsere Versuchspersonen bei einer realen Straßenüberquerung so riskant entscheiden würden. Wir vermuten, dass die objektiv gesehen absolut ungefährliche Laborsituation dazu geführt hat, dass die Proband:innen ein liberaleres Entscheidungskriterium als im Alltag verwendet haben. Insofern ist es wichtig, die für Experiment 2 berichteten Kollisionswahrscheinlichkeiten nicht absolut, sondern relativ (im Vergleich zwischen den Fahrzeugtypen) zu betrachten.

An den Experimenten nahmen überwiegend relativ junge und kognitiv leistungsfähige Versuchspersonen teil. Voraussetzungen für die Teilnahme waren ein normales Hörvermögen, normale oder korrigiert-normale Sehschärfe und normale stereoskopische Sehfähigkeit. Durch diese Kriterien konnten wir sicherstellen, dass die Proband:innen die dargebotenen auditiven und visuellen Informationen uneingeschränkt wahrnehmen konnten. Im Gegenzug stellt sich die Frage, inwiefern die vorliegenden Ergebnisse auf andere Gruppen von Versuchspersonen übertragbar sind. Bei Personen mit deutlichen Einschränkungen der Sehfähigkeit könnten auditive Informationen eine noch wichtigere Rolle spielen als bei normalsichtigen Personen. In diesem Fall könnten die Unterschiede in der akustischen Signatur von E-Fahrzeugen im Vergleich zu Verbrennern einen noch stärkeren Effekt haben als für normalsichtige Personen. Zur relativen Gewichtung auditiver und visueller Cues bei Kontaktzeitschätzungen oder Straßenüberquerungsentscheidungen liegen jedoch in der Literatur bislang keine Daten vor. Das Straßenüberquerungsverhalten der beiden Gruppen wurde zwar bereits verglichen (Geruschat, Hassan, Turano, Quigley, & Congdon, 2006; Guth, et al., 2013; Hassan & Snyder, 2012), jedoch kaum in Bezug auf Beschleunigung bzw. E-Fahrzeuge im Vergleich zu Verbrennern. Hier wären weitere Studien mit entsprechenden Personengruppen wünschenswert.

Bei Personen mit starker, unversorgter Schwerhörigkeit würden akustische Informationen und Unterschiede natürlich kaum eine Rolle spielen. Interessanter ist der Fall von mit Hörgeräten versorgten Personen. Die Signalverarbeitung selbst in modernen Hörgeräten kann zu Einschränkungen in der räumlichen Lokalisation von Schallquellen führen (vgl. z B. das Review von Akeroyd & Whitmer, 2016). Außerdem kann die Verarbeitung von dynamischen Intensitätsänderungen durch die Dynamikkompression verändert sein, die ein zentraler Baustein für auf Sprachverständlichkeit optimierte Signalverarbeitungsalgorithmen ist. Auch hier besteht also ein großer Forschungsbedarf.

Die Rolle kognitiver Unterschiede für TTC-Schätzungen und Straßenüberquerungsentscheidungen wurde bislang überwiegend indirekt im Zusammenhang mit Altersunterschieden untersucht (z. B. Butler, Lord, & Fitzpatrick, 2016; Dommes & Cavallo, 2011; Keshavarz et al., 2010; Plumert & Kearney, 2014; van der Meer, Gerlach, & Gehlert, 2020). Studien mit einem Fokus auf Beschleunigung bzw. Unterschieden zwischen E-Fahrzeugen und Verbrennern sind uns auf diesem Gebiet jedoch nicht bekannt. Aus der Grundlagenforschung wissen wir, dass jüngere Kinder selbst in einer Situation mit konstanter Geschwindigkeit des sich nähernden Fahrzeugs die Fahrdynamik weniger gut beurteilen können als Erwachsene und häufig distanzbasierte Heuristiken verwenden, die Unterschiede in der Geschwindigkeit vernachlässigen (Keshavarz, et al., 2010). Insofern liegt die Vermutung nahe, dass Kinder noch schlechter als Erwachsene eine Beschleunigung des sich nähernden Fahrzeugs berücksichtigen würden. Unterschiede im Fahrzeuggeräusch könnten somit eine noch größere Rolle spielen. Hier wären weitere Experimente wünschenswert.

In unseren Experimenten wurde ein räumlicher Hintergrundschall dargeboten, der einem ruhigen Wohngebiet entsprach und mit 37.5 dB A relativ leise war. Stärkerer Hintergrundschall könnte die Nutzung auditiver Information hinsichtlich der Bewegung des Fahrzeugs beeinträchtigen. Bei sehr lautem Hintergrundschall wäre also zu erwarten, dass der Vorteil durch die Präsentation der Fahrzeuggeräusche reduziert wird. Allerdings könnte hier wiederum eine Rolle spielen, dass die Antriebsstranggeräusche des Verbrenners im Mittel lauter als die der E-Fahrzeuge und somit auch in stärkerem Hintergrundschall besser wahrnehmbar sind. Zu diesem Aspekt wären weitere Experimente interessant, in denen deutlich lauterer diffuser Hintergrundschall wie an einem Verkehrsknotenpunkt oder punktueller Hintergrundschall zum Beispiel durch Verkehr auf der anderen Fahrbahn präsent ist.

Eine sehr interessante Frage, zu der uns bislang keinerlei Forschung bekannt ist, betrifft die Rolle der Alltagserfahrung für die hier gefundenen Unterschiede in TTC-Schätzungen und Straßenüberquerungsentscheidungen zwischen den Fahrzeugtypen. Als Erwachsene verfügen wir über jahrzehntelange Erfahrung mit Verbrennern, jedoch erst in jüngerer Vergangenheit mit E-Fahrzeugen. Diese Alltagserfahrung könnte dazu beigetragen haben, dass die TTC der Verbrenner bei Beschleunigung besser eingeschätzt werden konnte. Für ein E-Fahrzeug ohne AVAS ist das Fahrzeuggeräusch bei Beschleunigung prinzipiell etwas subtiler als einen Verbrenner, weshalb hier fraglich ist, ob lange Erfahrung mit beschleunigenden E-Fahrzeugen ohne AVAS zu ähnlich guten TTC-Schätzungen wie für Verbrenner führen könnte. Dies ist aber letztendlich eine empirische Frage. Für (spezifische) AVAS Konzepte

ist aus unserer Sicht eher denkbar, dass mit entsprechender Erfahrung/Training diese gut für die Beurteilung von Beschleunigung nutzbar sein sollten, auch dies wäre aber empirisch zu untersuchen.

Unsere Studie konzentrierte sich auf die Perspektive von Fußgänger:innen. Auch Radfahrer:innen nutzen auditive Information im Straßenverkehr, etwa um zumindest annähernd einzuschätzen, wann ein hinter ihnen (und damit außerhalb ihres Sichtfelds) fahrendes Fahrzeugs sie erreichen wird. Für diese Gruppe von Verkehrsteilnehmer:innen stellt sich insofern ebenfalls die Frage, ob es Unterschiede in der Nutzbarkeit auditiver Information zwischen E-Autos und Verbrennern gibt.

6.2 Praktische Implikationen

Vor dem Hintergrund der Befunde dieser Studie und unter Berücksichtigung ihrer Limitationen können praktische Implikationen für die Verkehrssicherheit formuliert werden. Die vorliegenden Daten zeigen zum ersten Mal, dass auditive Information (Fahrzeuggeräusche) nicht nur bei der akustischen Detektion von Fahrzeugen eine Rolle spielt (wenn das Fahrzeug sich außerhalb des Sichtfelds befindet). Vielmehr sind die Fahrzeuggeräusche auch dann relevant, wenn in Straßenüberquerungssituationen das Fahrzeug vollständig sichtbar ist. Dabei konnten wir ebenfalls erstmalig zeigen, dass bei beschleunigten Heranfahrten die veränderte akustische Signatur von E-Fahrzeugen einen möglichen Risikofaktor für Fußgänger:innen in Straßenüberquerungssituationen darstellt. Zur akustischen Detektion von Fahrzeugen (*"Ist ein Fahrzeug in meiner Nähe?"*) gibt es eine größere Anzahl von Studien, deren Ergebnisse die Motivation und Grundlage für die aktuellen gesetzlichen Vorgaben für ein AVAS bilden (z. B. Altinsoy et al., 2015; Emerson, Kim, Naghshineh, Pliskow, & Myers, 2013; Poveda-Martinez et al., 2017). Der Aspekt von Straßenüberquerungsentscheidungen (*"Wann wird das Fahrzeug an meiner Position eintreffen?"*) sollte in zukünftigen Studien und technischen Entwicklungen ebenso berücksichtigt werden wie der Aspekt der Detektion von Fahrzeugen. Unsere Befunde, dass ein den Vorgaben von UNECE R138 entsprechendes AVAS die TTC-Schätzungen und Straßenüberquerungsentscheidungen zwar im Vergleich zu einem E-Auto ohne AVAS verbessert, die Einschätzungen aber nach wie vor riskanter als für einen Verbrenner sind, weisen darauf hin, dass es bei der Gestaltung der akustischen Warnsysteme noch Verbesserungspotential gibt. Unmittelbar relevant ist hier die derzeit gesetzlich mögliche Abschaltung des AVAS bei Geschwindigkeiten oberhalb von 20 km/h. Obwohl in unserem Testfahrzeug das AVAS sogar bis 28 km/h aktiv war, zeigte sich der beschriebene Nachteil gegenüber dem Verbrenner. Die Daten aus

Experiment 1 (Abbildung 12) zeigen für E-Autos ohne AVAS eine Überschätzung der TTC gegenüber dem Verbrenner auch bei höheren Geschwindigkeiten zum Zeitpunkt der TTC-Schätzung. Hier sollte untersucht werden, ob ein auch bei höheren Geschwindigkeiten ein aktives AVAS die Schätzungen weiter verbessern kann. Generell sind verbesserte AVAS Konzepte wünschenswert, die nicht nur auf eine den Verbrennern entsprechende Detektionsleistung für Fahrzeuge hin entworfen sind (wie in den aktuellen Vorgaben), sondern auch auf eine Beurteilung der Fahrzeugbewegung bei Beschleunigung. Aus unseren Daten ergibt sich die Vorhersage, dass für ein künstlich mit den Fahrzeuggeräuschen eines Verbrenners versehenes E-Auto die TTC-Schätzungen genauso gut wie für einen Verbrenner sein sollten. Natürlich ist eine Klangsignatur und vor allem eine Lautstärke wie Verbrennern jedoch aus Lärmgesichtspunkten nicht wünschenswert. Hier stellt sich die interessante Frage für die Forschung und Entwicklung, ob auch mit anderen AVAS Konzepten die akustische Information über Beschleunigung auf gleichem Niveau kommuniziert werden kann wie für einen Verbrenner, auch wenn ihre Lautstärke geringer ist als beim Verbrenner. Verbesserte AVAS-Konzepte, die nicht nur auf die basale Fahrzeugdetektion, sondern auch auf die Kommunikation dynamischer Fahrprofile ausgelegt sind, könnten die Wahrnehmung von Fahrzeugen unterstützen und dadurch ggf. auch zum Schutzfaktor für schwächere Verkehrsteilnehmer:innen im Straßenverkehr werden.

Unabhängig von möglichen zukünftigen Verbesserungen von akustischen Warnsystemen folgt aus den vorliegenden Versuchsergebnissen, die ein Kollisionsrisiko in der Interaktion von Fußgänger:innen mit beschleunigenden E-Fahrzeugen zeigen, dass für dieses Risiko ein Bewusstsein geschaffen werden sollte, etwa durch Medienkampagnen oder in der Verkehrserziehung.

7 Literaturverzeichnis

- Ahrens, J., Rabenstein, R., & Spors, S. (2014).** Sound field synthesis for audio presentation. *Acoustics Today*, 10(2), 15-25.
- Akeroyd, M. A., & Whitmer, W. M. (2016).** Spatial hearing and hearing aids. In G. R. Popelka, B. C. J. Moore, R. R. Fay & A. N. Popper (Eds.), *Hearing Aids* (Vol. 56, pp. 181-215).
- Allen, J. B., & Berkley, D. A. (1979).** Image method for efficiently simulating small-room acoustics. *Journal of the Acoustical Society of America*, 65(4), 943-950. doi: 10.1121/1.382599
- Altinsoy, E., Landgraf, J., Rosenkranz, R., Lachmann, M., Hagen, K., Schulze, C., & Schlag, B. (2015).** Wahrnehmung und Bewertung von Fahrzeugaußengeräuschen durch Fußgänger in verschiedenen Verkehrssituationen und unterschiedlichen Betriebszuständen. *FAT Schriftenreihe: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen*(278).
- Bach, M. (1996).** The Freiburg Visual Acuity test: Automatic measurement of visual acuity. *Optometry and Vision Science*, 73(1), 49-53. doi: 10.1097/00006324-199601000-00008
- Baurès, R., Oberfeld, D., Tournier, I., Hecht, H., & Cavallo, V. (2014).** Arrival-time judgments on multiple-lane streets: The failure to ignore irrelevant traffic. *Accident Analysis & Prevention*, 65(0), 72-84. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aap.2013.12.013>
- Békésy, G. v. (1947).** A new audiometer. *Acta Oto-Laryngologica*, 35(5-6), 411-422.
- Belsley, D. A., Kuh, E., & Welsch, R. A. (1980).** *Regression diagnostics: Identifying influential data and sources of collinearity*. Hoboken, N.J.: Wiley.
- Benguigui, N., Ripoll, H., & Broderick, M. P. (2003).** Time-to-contact estimation of accelerated stimuli is based on first-order information. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 29(6), 1083-1101. doi: 10.1037/0096-1523.29.6.1083
- Bennett, A. G., & Rabbetts, R. B. (1998).** *Clinical visual optics* (3 ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Bootsma, R. J., & Oudejans, R. R. D. (1993).** Visual information about time-to-collision between two objects. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 19(5), 1041-1052. doi: 10.1037//0096-1523.19.5.1041
- Butler, A. A., Lord, S. R., & Fitzpatrick, R. C. (2016).** Perceptions of speed and risk: Experimental studies of road crossing by older people. *Plos One*, 11(4). doi: 10.1371/journal.pone.0152617

Caird, J. K., & Hancock, P. A. (1994). The perception of arrival time for different oncoming vehicles at an intersection. *Ecological Psychology*, 6(2), 83-109. doi: 10.1207/s15326969eco0602_1

Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). Hillsdale, N.J.: L. Erlbaum Associates.

Connelly, M. L., Conaglen, H. M., Parsonson, B. S., & Isler, R. B. (1998). Child pedestrians' crossing gap thresholds. *Accident Analysis and Prevention*, 30(4), 443-453. doi: 10.1016/s0001-4575(97)00109-7

Daniel, J. (2000). *Représentation de champs acoustiques, application à la transmission et à la reproduction de scènes sonores complexes dans un contexte multimédia*. Ph.D., Université Pierre et Marie Curie (Paris VI).

DeLucia, P. R. (1991). Pictorial and motion-based information for depth perception. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 17(3), 738-748.

DeLucia, P. R., Preddy, D., & Oberfeld, D. (2016). Audiovisual integration of time-to-contact information for approaching objects. *Multisensory Research*, 29(4-5), 365–395. doi: 10.1163/22134808-00002520

DIN ISO 9613-2:1999-10. (1999). Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien. Teil 2: Allgemeines Berechnungsverfahren.

Dommes, A., & Cavallo, V. (2011). The role of perceptual, cognitive, and motor abilities in street-crossing decisions of young and older pedestrians. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 31(3), 292-301. doi: 10.1111/j.1475-1313.2011.00835.x

Dommes, A., Cavallo, V., Dubuisson, J. B., Tournier, I., & Vienne, F. (2014). Crossing a two-way street: comparison of young and old pedestrians. *Journal of Safety Research*, 50, 27-34. doi: 10.1016/j.jsr.2014.03.008

Emerson, R. W., Kim, D. S., Naghshineh, K., Pliskow, J., & Myers, K. (2013). Detection of quiet vehicles by blind pedestrians. *Journal of Transportation Engineering*, 139(1), 50-56. doi: 10.1061/(asce)te.1943-5436.0000478

Feldstein, I. T., & Dyszak, G. N. (2020). Road crossing decisions in real and virtual environments: A comparative study on simulator validity. *Accident Analysis and Prevention*, 137. doi: 10.1016/j.aap.2019.105356

Geruschat, D. R., Hassan, S. E., Turano, K. A., Quigley, H. A., & Congdon, N. G. (2006). Gaze behavior of the visually impaired during street crossing. *Optometry and Vision Science*, 83(8), 550-558. doi: 10.1097/01.opx.0000232219.23362.a6

Gerzon, M. A. (1985). Ambisonics in multichannel broadcasting and video. *Journal of the Audio Engineering Society*, 33(11), 859-871.

Gordon, C. C., Churchill, T., Clauser, C. E., Bradtmiller, B., McConville, J. T., Tebbetts, I., & Walker, R. A. (1989). Anthropometric survey of US Army

personnel: Summary statistics, Interim report for 1988. *Anthropology Research Project INC Yellow Springs OH*.

Grimm, G., Luberadzka, J., & Hohmann, V. (2019). A toolbox for rendering virtual acoustic environments in the context of audiology. *Acta Acustica United with Acustica*, 105(3), 566-578. doi: 10.3813/aaa.919337

Grosse, J., Weber, R., & Van de Par, S. (2013). Measurements and model predictions of detection thresholds for a conventional and electric vehicle in traffic and pink noise. In D. G. f. Akustik (Ed.), *AIA-DAGA 2013: Proceedings of the International Conference on Acoustics, Merano, March 18-21, 2013* (pp. 538-541). Merano

Guth, D. A., Long, R. G., Emerson, R. S. W., Ponchillia, P. E., & Ashmead, D. H. (2013). Blind and sighted pedestrians' road-crossing judgments at a single-lane roundabout. *Human Factors*, 55(3), 632-642. doi: 10.1177/0018720812459884

Hassan, S. E. (2012). Are normally sighted, visually impaired, and blind pedestrians accurate and reliable at making street crossing decisions? *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 53(6), 2593-2600. doi: 10.1167/iovs.11-9340

Hassan, S. E., & Snyder, B. D. (2012). Street-crossing decision-making: A comparison between patients with age-related macular degeneration and normal vision. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 53(10), 6137-6144. doi: 10.1167/iovs.12-10023

Horswill, M. S., Helman, S., Ardiles, P., & Wann, J. P. (2005). Motorcycle accident risk could be inflated by a time to arrival illusion. *Optometry and Vision Science*, 82(8), 740-746. doi: 10.1097/01.opx.0000175563.21423.50

Hoyle, F. (1957). *The Black Cloud*. London: Heinemann.

Ishaque, M. M., & Noland, R. B. (2008). Behavioural issues in pedestrian speed choice and street crossing behaviour: A review. *Transport Reviews*, 28(1), 61-85. doi: 10.1080/01441640701365239

Jacobsen, G. N., Ih, J.-G., Song, W., & Macdonald, E. N. (2016). Predicting detectability and annoyance of EV warning sounds using partial loudness. In W. Kropp (Ed.), *INTER-NOISE 2016: Proceedings of the 45th International Congress on Noise Control Engineering, Hamburg, August 21-24, 2016* (pp. 1706-1715). Hamburg

James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2013). *An introduction to statistical learning* (Vol. 103): Springer Science+Business Media New York 2013.

Jenison, R. L. (1996). Estimation of time-to-arrival from acoustic information. *Acustica*, 82, S96-S96.

Jenison, R. L. (1997). On acoustic information for motion. *Ecological Psychology*, 9(2), 131-151.

- Kaiser, M. K., & Hecht, H. (1995).** Time-to-passage judgments in nonconstant optical flow fields. *Perception and Psychophysics*, 57(6), 817-825. doi: 10.3758/bf03206797
- Kenward, M. G., & Roger, J. H. (1997).** Small sample inference for fixed effects from restricted maximum likelihood. *Biometrics*, 53(3), 983-997. doi: 10.2307/2533558
- Keshavarz, B., Campos, J. L., DeLucia, P. R., & Oberfeld, D. (2017).** Estimating the relative weights of visual and auditory tau versus heuristic-based cues for time-to-contact judgments in realistic, familiar scenes by older and younger adults. *Attention Perception & Psychophysics*, 79(3), 929-944. doi: 10.3758/s13414-016-1270-9
- Keshavarz, B., & Hecht, H. (2011).** Validating an Efficient Method to Quantify Motion Sickness. *Human Factors*, 53(4), 415-426. doi: 10.1177/0018720811403736
- Keshavarz, B., Landwehr, K., Baurès, R., Oberfeld, D., Hecht, H., & Benguigui, N. (2010).** Age-correlated incremental consideration of velocity information in relative time-to-arrival judgments. *Ecological Psychology*, 22(3), 212-221. doi: 10.1080/10407413.2010.496670
- Law, D. J., Pellegrino, J. W., Mitchell, S. R., Fischer, S. C., McDonald, T. P., & Hunt, E. B. (1993).** Perceptual and cognitive factors governing performance in comparative arrival-time judgments. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 19(6), 1183-1199.
- Lee, D. N., & Young, D. S. (1985).** Visual timing of interceptive action. In D. J. Ingle, M. Jeannerod & D. N. Lee (Eds.), *Brain mechanisms and spatial vision. Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Brain Mechanisms and Spatial Vision, Lyon, France, June 16-25, 1983.* (pp. 1-30). Dordrecht: Martinus Nijhoff Publishers.
- Lee, D. N., Young, D. S., & McLaughlin, C. M. (1984).** A roadside simulation of road crossing for children. *Ergonomics*, 27(12), 1271-1281. doi: 10.1080/00140138408963608
- Lee, Y. M., Madigan, R., Garcia, J., Tomlinson, A., Solernou, A., Romano, R., . . . Uttley, J. (2019).** *Understanding the messages conveyed by automated vehicles.* Paper presented at the Proceedings of the 11th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, Utrecht, Netherlands. doi: 10.1145/3342197.3344546
- Levitt, H. (1971).** Transformed up-down methods in psychoacoustics. *Journal of the Acoustical Society of America*, 49(2), Suppl 2:467-477.
- Nakagawa, S., & Schielzeth, H. (2013).** A general and simple method for obtaining R^2 from generalized linear mixed-effects models. *Methods in Ecology and Evolution*, 4(2), 133-142. doi: 10.1111/j.2041-210x.2012.00261.x

NHTSA 141. (2018). Federal Motor Vehicle Safety Standard No. 141: Minimum Sound Requirements for Hybrid and Electric Vehicles.

Oberfeld, D., & Hecht, H. (2008). Effects of a moving distractor object on time-to-contact judgments. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 34(3), 605-623. doi: 10.1037/0096-1523.34.3.605

Oxley, J. A., Ihsen, E., Fildes, B. N., Charlton, J. L., & Day, R. H. (2005). Crossing roads safely: An experimental study of age differences in gap selection by pedestrians. *Accident Analysis and Prevention*, 37(5), 962-971. doi: 10.1016/j.aap.2005.04.017

Parizet, E., Ellermeier, W., & Robart, R. (2014). Auditory warnings for electric vehicles: Detectability in normal-vision and visually-impaired listeners. *Applied Acoustics*, 86, 50-58. doi: 10.1016/j.apacoust.2014.05.006

Petzoldt, T. (2014). On the relationship between pedestrian gap acceptance and time to arrival estimates. *Accident Analysis and Prevention*, 72, 127-133. doi: 10.1016/j.aap.2014.06.019

Plumert, J. M., & Kearney, J. K. (2014). How do children perceive and act on dynamic affordances in crossing traffic-filled roads? *Child Development Perspectives*, 8(4), 207-212. doi: 10.1111/cdep.12089

Poveda-Martinez, P., Peral-Orts, R., Campillo-Davo, N., Nescolarde-Selva, J., Lloret-Climent, M., & Ramis-Soriano, J. (2017). Study of the effectiveness of electric vehicle warning sounds depending on the urban environment. *Applied Acoustics*, 116, 317-328. doi: 10.1016/j.apacoust.2016.10.003

Regan, D., & Gray, R. (2000). Visually guided collision avoidance and collision achievement. *Trends in Cognitive Sciences*, 4(3), 99-107. doi: 10.1016/s1364-6613(99)01442-4

Rosenbaum, D. A. (1975). Perception and extrapolation of velocity and acceleration. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 1(4), 395-403. doi: 10.1037/0096-1523.1.4.395

Rosenblum, L. D., Wuestefeld, A. P., & Saldana, H. M. (1993). Auditory looming perception: Influences on anticipatory judgments. *Perception*, 22(12), 1467-1482. doi: 10.1068/p221467

Schiff, W., & Detwiler, M. L. (1979). Information used in judging impending collision. *Perception*, 8(6), 647-658.

Schiff, W., & Oldak, R. (1990). Accuracy of judging time to arrival: Effects of modality, trajectory, and gender. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16(2), 303-316.

Schubert, T., Friedmann, F., & Regenbrecht, H. (2001). The experience of presence: Factor analytic insights. *Presence-Teleoperators and Virtual Environments*, 10(3), 266-281. doi: 10.1162/105474601300343603

Statistisches Bundesamt. (2017). *Verkehr: Verkehrsunfälle (Fachserie 8, Reihe 7)* (Vol. 4/2017). Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.

Steinbach, L., Altinsoy, E. M., & Rosenkranz, R. (2017). Elektromobilität: Angepasste Geschwindigkeits-Pegel-Skalierung erhöht die Sicherheit. In D. G. f. Akustik (Ed.), *DAGA 2017: Die 43. Jahrestagung für Akustik, Kiel, March 06-09, 2017* (pp. 601-604). Kiel.

Treutwein, B., & Strasburger, H. (1999). Fitting the psychometric function. *Perception & Psychophysics*, 61(1), 87-106.

Tukey, J. W. (1977). *Exploratory Data Analysis*. Reading, Mass.: Addison-Wesley Pub. Co.

UNECE R138. (2017). Regelung Nr. 138 der Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (UNECE) — Einheitliche Bestimmungen für die Genehmigung geräuscharmer Straßenfahrzeuge hinsichtlich ihrer verringerten Hörbarkeit.

van der Meer, E., Gerlach, R., & Gehlert, T. (2020). *Entwicklung der Geschwindigkeitswahrnehmung bei Kindern*. Berlin: Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V., Unfallforschung der Versicherer.

Witmer, B. G., & Singer, M. J. (1998). Measuring presence in virtual environments: A presence questionnaire. *Presence-Teleoperators and Virtual Environments*, 7(3), 225-240. doi: 10.1162/105474698565686

Wu, H. J., Ashmead, D. H., Adams, H., & Bodenheimer, B. (2018). *3D sound rendering in a virtual environment to evaluate pedestrian street crossing decisions at a roundabout*.

Yarkoni, T., & Westfall, J. (2017). Choosing prediction over explanation in psychology: Lessons from machine learning. *Perspectives on Psychological Science*, 12(6), 1100-1122. doi: 10.1177/1745691617693393

Yasui, N., & Miura, M. (2016). Effect of amplitude envelope on detectability of warning sound for quiet vehicle. In W. Kropp (Ed.), *INTER-NOISE 2016: Proceedings of the 45th International Congress on Noise Control Engineering, Hamburg, August 21-24, 2016* (pp. 1698-1705). Hamburg.

Zeller, P. (Ed.). (2018). *Handbuch Fahrzeugakustik*: Springer.

Zhou, L., Yan, J., Liu, Q., Li, H., Xie, C., Wang, Y., . . . Sun, H.-J. (2007). Visual and auditory information specifying an impending collision of an approaching object. In J. Jacko (Ed.), *Human-Computer Interaction: Interaction Platforms and Techniques. Part II of the 12th International Conference, HCI International 2007, Beijing, China, July 2007* (Vol. 4551, pp. 720-729).

8 Abkürzungsverzeichnis

ANOVA	Analysis of Variance, Varianzanalyse
AVAS	auditory vehicle alerting system, akustisches Warnsystem für E-Autos
FMS	Fast Motion Sickness Scale, Ratingskala zur Erfassung der Simulatorkrankheit
f_s	Samplingfrequenz
GPS	Global Positioning System
HMD	Head Mounted Display, Virtual Reality Headset
IPQ	Igroup Presence Questionnaire, Fragebogen zur Erfassung der Immersion in VR
LMM	linear mixed-effects model, lineares gemischtes Regressionsmodell
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration
OSC	Open Sound Control Protokoll, Software zur Datenübertragung
PMF	psychometrische Funktion
PRESS	predicted residual sum of squares, Summe der quadrierten Vorhersagefehler
REML	restricted maximum likelihood, Methode der beschränkten maximalen Wahrscheinlichkeit
rmANOVA	repeated-measures Analysis of Variance, Varianzanalyse mit Messwiederholung
RTK	Real Time Kinematic
TASCAR	Toolbox for Acoustic Scene Creation and Rendering, Software zur Simulation auditiver Stimuli
TTC	time-to-collision / time-to-contact, Kontaktzeit
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
VESS	Virtual Engine Sound System, Bezeichnung des AVAS beim Kia eNiro.
VR	virtual reality, virtuelle Realität

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Messaufbau an der Teststrecke. Die orangefarbenen Hütchen markieren die Distanz zur Referenzposition und signalisieren dem Testfahrer den Zeitpunkt des Starts der Beschleunigung. Das rote Hütchen markiert die Referenzposition. Das blaue Hütchen markiert die von der Referenzposition 5 m entfernte Lichtschranke, die das Vorbeifahren des Testfahrzeugs registriert.....	18
Abbildung 2: Messaufbau an der Teststrecke. An der Referenzposition (links) befinden sich Kunstkopf und Freifeldmikrofon. Rechts daneben ist die Lichtschranke aufgebaut.	19
Abbildung 3: Skizzierung des lokalen Koordinatensystems entlang der Teststrecke, das in die virtuelle Straßenszene übertragen wurde. Der Ursprung des Koordinatensystems entspricht der Referenzposition.	19
Abbildung 4: Array aus 16 kreisförmig angeordneten Lautsprechern zur auditiven Darbietung des räumlichen Schallfelds im Labor (Ambisonics 7. Ordnung).....	27
Abbildung 5: Stereoskopische Ansicht der virtuellen Verkehrsszene mit zweistreifiger Straße.....	31
Abbildung 6: Beispiel eines Geschwindigkeitsprofils einer Beschleunigungsfahrt des E-Fahrzeugs. Die tatsächliche (grüne Linie) und die intendierte Geschwindigkeit (schwarze Linie) werden über den Zeitverlauf eines Trials dargestellt.....	35
Abbildung 7: Ablauf eines Trials. Zum Zeitpunkt t_{start} startet der Trial. Nach $dur_{preacc} = 2$ s setzt bei $t_{accOnset}$ die Beschleunigung des Fahrzeuges ein. Nach $dur_{postacc} = 3$ s setzt bei t_{occ} die Okklusion ein. Die Versuchsperson schätzt nun den Zeitpunkt t_{est} , an dem das Fahrzeug an ihrer Position ankommen würde. Dabei entspricht das Zeitintervall zwischen t_{occ} und t_{est} der TTC-Schätzung TTC_{est}	36
Abbildung 8: Konstantfahrten. Gefahrene konstante Geschwindigkeit (v_{avg}) als Funktion der intendierten Geschwindigkeit (v) für die drei Fahrzeugtypen (rot: Verbrenner, blau: E-Auto ohne AVAS, grün: E-Auto mit AVAS).	38
Abbildung 9: Mittlere gefahrene Beschleunigung (a_{avg}) innerhalb des Zeitfensters von 1.0 s vor Okklusionsbeginn bis Okklusion [$t_{occ} - 1.0$ s, t_{occ}] als Funktion der Geschwindigkeit bei Okklusion (v_{occ}), für die drei Fahrzeugtypen (Farbkodierung) und die nominalen Ausgangsgeschwindigkeiten (Formkodierung). Linkes Panel: intendierte Beschleunigung $a = 0.6$ m/s ² . Rechtes Panel: intendierte Beschleunigung $a = 2.0$ m/s ²	39

- Abbildung 10: Experiment 1. Mittlere TTC-Schätzungen bei den Konstantfahrten als Funktion der tatsächlichen TTC. Jedes Panel zeigt eine nominale Geschwindigkeit. Die Diagonale entspricht einer perfekten TTC-Schätzung. Rot: Verbrenner. Blau: E-Auto ohne AVAS. Grün: E-Auto mit AVAS. Die Fehlerbalken zeigen ± 1 Standardfehler des Mittelwerts. 43
- Abbildung 11: Mittlere TTC-Schätzungen bei den Beschleunigungsfahrten in Experiment 1 als Funktion der Beschleunigung a_{avg} . Jede Zeile zeigt eine Ausgangsgeschwindigkeit (v_0), jede Spalte zeigt eine dargebotene TTC. Rot: Verbrenner. Blau: E-Auto ohne AVAS. Grün: E-Auto mit AVAS. Die Fehlerbalken zeigen ± 1 Standardfehler des Mittelwerts. Die graue gestrichelte Linie repräsentiert eine perfekte Schätzung der TTC. Binweite 0.2 m/s². 48
- Abbildung 12: Experiment 1. Vom per Kreuzvalidierung ausgewählten Regressionsmodell für Verbrenner und E-Auto ohne AVAS vorhergesagte TTC-Schätzungen für die Beschleunigungsfahrten als Funktion der gefahrenen Beschleunigung (x -Achse), der Fahrzeugtypen (farbliche Kodierung), der Geschwindigkeit bei Okklusion (Zeilen) und der tatsächlichen TTC (Spalten). Die graue, gestrichelte Linie repräsentiert die tatsächliche TTC. Die gelbe, gestrichelte Linie repräsentiert eine first-order TTC-Schätzung. Rot: Verbrenner. Blau: E-Auto ohne AVAS. 53
- Abbildung 13: Experiment 1. Vom per Kreuzvalidierung ausgewählten Regressionsmodell für Verbrenner, E-Auto ohne AVAS und E-Auto mit AVAS vorhergesagte TTC-Schätzungen für die Beschleunigungsfahrten bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von 10 km/h als Funktion der gefahrenen Beschleunigung (x -Achse), der Fahrzeugtypen (farbliche Kodierung) und der tatsächlichen TTC (Spalten). Für die Vorhersage wurde die mittlere im Experiment bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von 10 km/h erreichte Geschwindigkeit bei Okklusion von 26.69 km/h angenommen. Die graue, gestrichelte Linie repräsentiert die tatsächliche TTC. Die gelbe, gestrichelte Linie repräsentiert eine first-order TTC-Schätzung. Rot: Verbrenner. Blau: E- E-Auto ohne AVAS. Grün: E-Auto mit AVAS. .. 56
- Abbildung 14: Ansicht der virtuellen einstreifigen Straße aus Perspektive der Versuchsperson in Experiment 2. 61
- Abbildung 15: Mittlere akzeptierte TTC bei den Konstantfahrten in Experiment 2 als Funktion der konstanten Geschwindigkeit v_0 und des Fahrzeugtyps. Rot: Verbrenner. Blau: E-Auto ohne AVAS. Grün: E-Auto mit AVAS. Die Fehlerbalken zeigen ± 1 Standardfehler des Mittelwerts. 67

- Abbildung 16: Konstantfahrten in Experiment 2. Mittlere Kollisionswahrscheinlichkeit (Wahrscheinlichkeit einer positiven Straßenüberquerungsentscheidung, wenn die TTC bei Okklusion kürzer als die individuelle mittlere Überquerungszeit der Straße war) als Funktion der konstanten Geschwindigkeit v_0 und des Fahrzeugtyps. Rot: Verbrenner. Blau: E-Auto ohne AVAS. Grün: E-Auto mit AVAS. Die Fehlerbalken zeigen ± 1 Standardfehler des Mittelwerts. 69
- Abbildung 17: Mittlere akzeptierte TTC bei den Beschleunigungsfahrten in Experiment 2 als Funktion der Beschleunigung a_{avg} und des Fahrzeugtyps. Rot: Verbrenner. Blau: E-Auto ohne AVAS. Grün: E-Auto mit AVAS. Die Fehlerbalken zeigen ± 1 Standardfehler des Mittelwerts. Binweite = 0.2 m/s^2 72
- Abbildung 18: Vorhergesagte mittlere $TTC_{50\%}$ bei den Beschleunigungsfahrten in Experiment 2 als Funktion der Beschleunigung a_{avg} und des Fahrzeugtyps. Rot: Verbrenner. Blau: E-Auto ohne AVAS. Grün: E-Auto mit AVAS. Für die Modellvorhersage wurde eine Okklusionsgeschwindigkeit v_{occ} von 30 km/h angenommen. 73
- Abbildung 19: Mittlere Kollisionswahrscheinlichkeit (Wahrscheinlichkeit einer positiven Straßenüberquerungsentscheidung, wenn die TTC bei Okklusion kürzer als die individuelle mittlere Überquerungszeit der Straße war) als Funktion der Beschleunigung a_{avg} und des Fahrzeugtyps. Rot: Verbrenner. Blau: E-Auto ohne AVAS. Grün: E-Auto mit AVAS. Die Fehlerbalken zeigen ± 1 Standardfehler des Mittelwerts. 74
- Abbildung 20: Vorhergesagte mittlere Kollisionswahrscheinlichkeit bei den Beschleunigungsfahrten in Experiment 2 als Funktion der Beschleunigung a_{avg} und des Fahrzeugtyps. Rot: Verbrenner. Blau: E-Auto ohne AVAS. Grün: E-Auto mit AVAS. 76
- Abbildung 21: Experiment 3. Mittlerer Anteil an korrekten Antworten (p_{corr}) in der Beschleunigungsdetektionsaufgabe als Funktion der Beschleunigung. Obere Reihe: $v_0 = 10 \text{ km/h}$. Untere Reihe: $v_0 = 30 \text{ km/h}$. Linke Spalte: Verbrenner. Mittlere Spalte: E-Auto ohne AVAS. Rechte Spalte: E-Auto mit AVAS. Offene Symbole: rein visuelle Darbietung (V; ohne Sound). Ausgefüllte Symbole: audiovisuelle Darbietung (AV; mit Sound). Fehlerbalken: 95%-Konfidenzintervalle. Die untere horizontale Linie ($p_{corr} = 0.5$) repräsentiert die Ratewahrscheinlichkeit..... 81

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Positionen der am Fahrzeug montierten Mikrofone bei Verbrenner und E-Auto.....	21
Tabelle 2: Anzahl der selektierten akustischen Aufnahmen pro Geschwindigkeitsprofil und Fahrzeugtyp. Die Zahl in Klammern gibt die Anzahl der Aufnahmen mit fahrtechnisch bedingtem Schaltvorgang des Verbrenners an.....	26
Tabelle 3: Geschätzte fixed effects Parameter des Modells für die Beschleunigungsfahrten (ohne E-Auto mit AVAS). Dargestellt sind Effektschätzer (β), Standardfehler (SE), Freiheitsgrade (df), t - und p -Werte.....	51
Tabelle 4: Experiment 1. Geschätzte fixed effects Parameter des Modells für die Beschleunigungsfahrten bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von 10 km/h. Dargestellt sind die geschätzten Parameter (β), Standardfehler (SE), Freiheitsgrade (df), t - und p -Werte.....	55
Tabelle 5: In Experiment 2 präsentierte Geschwindigkeitsprofile und entsprechende Anzahl der akustischen Aufnahmen pro Geschwindigkeitsprofil und Fahrzeugtyp.....	60
Tabelle 6: Experiment 2. Geschätzte fixed effects Parameter des Modells zur Vorhersage $TTC_{50\%}$ für die Beschleunigungsfahrten. Dargestellt sind die geschätzten Parameter (β), Standardfehler (SE), Freiheitsgrade (df), t - und p -Werte.	70
Tabelle 7: Experiment 2. Geschätzte fixed-effects Parameter des Modells zur Vorhersage der Kollisionswahrscheinlichkeit für die Beschleunigungsfahrten. Dargestellt sind die geschätzten Parameter (β), Standardfehler (SE), Freiheitsgrade (df), t - und p -Werte.	75
Tabelle 8: Anzahl der im Experimente 3 verwendeten akustischen Aufnahmen der Beschleunigungsfahrten, aufgeteilt nach Geschwindigkeitsprofil und Fahrzeugtyp.....	79
Tabelle 9: Anzahl der im Experimente 3 verwendeten akustischen Aufnahmen der Konstantfahrten, aufgeteilt nach Geschwindigkeit und Fahrzeugtyp.	79
Tabelle 10: Experiment 3. Ergebnisse der rmANOVA für die Antwortgüte (Anteil korrekter Antworten, p_{corr}) bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von 10 km/h. Es werden die unkorrigierten Zähler- und Nennerfreiheitsgrade, der Huynh-Feldt-Korrekturfaktor ϵ , F - und p -Werte sowie das partielle η^2 für die Haupt- und Interaktionseffekte der Faktoren Modalität (A, AV), Beschleunigung (a) und Fahrzeugtyp (Verbrenner, E-Auto ohne AVAS, E-Auto mit AVAS) berichtet.....	84

Tabelle 11: Experiment 3, Beschleunigungsdetektion. Ergebnisse der rmANOVA von p_{corr} bei einer Beschleunigung von 2.0 m/s^2 . Es werden Zähler- und Nennerfreiheitsgrade, F - und p -Werte sowie das partielle η^2 für die Haupt- und Interaktionseffekte der Faktoren Modalität, Ausgangsgeschwindigkeit (v_0) und Fahrzeugtyp berichtet. 84

11 Anhang

11.1 Präsenzgefühl

Das mit dem IPQ-Fragebogen (Schubert, et al., 2001) gemessene allgemeine Präsenzgefühl wurde in allen drei Experimenten erhoben und beschreibt, wie stark der Eindruck war, in der computererzeugten Welt gewesen zu sein. Der Maximalwert von 6.0 gibt an, dass diesen Eindruck sehr stark war. Das allgemeine Präsenzgefühl der Versuchspersonen lag mit einem Mittelwert von 4.27 ($SD = 1.01$) in Experiment 1 und einem Mittelwert von 3.74 ($SD = 1.28$) in Experiment 2 und einem Mittelwert von 3.21 ($SD = 1.08$) in Experiment 3 jeweils über dem Skalenmittelpunkt. Da die Skalen des IPQ vornehmlich auf die visuelle Modalität zugeschnitten sind, haben wir folgendes Item ergänzt. Auf einer 7-stufigen Ratingskala wurde der erlebte Realismus zwischen der virtuellen visuellen und der virtuellen auditiven Umgebung verglichen (Wertkodierung 0 = visuell realistischer als auditiv, 3 = visuell so realistisch wie auditiv, 6 = visuell weniger realistisch als auditiv). Hier gaben die Versuchsteilnehmer:innen im Mittel an, dass sie die auditive Umgebung als realer empfanden als die visuelle (Experiment 1: $M = 5.00$, $SD = 1.05$; Experiment 2: $M = 5.24$, $SD = 0.83$; Experiment 3: $M = 4.86$, $SD = 1.30$).



Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V.

Wilhelmstraße 43 / 43G

10117 Berlin

Postfach 08 02 64

10002 Berlin

Tel. 030/2020-5000

Fax 030/2020-6000

berlin@gdv.org, unfallforschung@gdv.de

www.gdv.de, www.udv.de