Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V.

Unfallforschung kompakt Nr. 114

Wahrnehmung von Elektrofahrzeugen



Unfallforschung der Versicherer
GDV

Impressum

Herausgeber
Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V.
Wilhelmstraße 43 / 43 G, 10117 Berlin
Postfach 08 02 64, 10002 Berlin
Telefon 030 / 20 20 – 58 21, Fax 030 / 20 20 – 66 33
www.udv.de, www.gdv.de, unfallforschung@gdv.de

Redaktion
Sophie Kröling, M.Sc.

Realisation
pensiero KG, www.pensiero.eu

Bildnachweis
Titelbild: Vera Stadler – pensiero ;
die Nutzungsrechte der weiteren in dieser
Broschüre abgebildeten Fotos liegen bei
der Unfallforschung der Versicherer.

Erschienen: 3/2022

FSC
www.fsc.org
MIX
Aus verantwortungs-
vollen Quellen
FSC® C126256

Inhalt

04 Vorbemerkung

04 Projektziel

05 Audiovisuelles Virtual-Reality-System

06 Kontaktzeitschätzung

09 Straßenquerungsentscheidungen

10 Detektion von Beschleunigung

14 Zusammenfassung und Diskussion

15 Fazit

16 Literatur

Vorbemerkung

Im Straßenverkehr müssen Fußgänger:innen anhand visueller und akustischer Informationen die Bewegung von Fahrzeugen einschätzen, um zum Beispiel beim Überqueren einer Straße nicht mit einem Fahrzeug zu kollidieren. Sie zählen zu den vulnerablen Verkehrsteilnehmer:innen. Im Jahr 2020 waren insgesamt 26.130 Fußgänger:innen an Unfällen mit Personenschaden beteiligt [1]. Die meisten innerorts getöteten Verkehrsteilnehmer:innen waren zu Fuß unterwegs [1].

Die häufigsten Fehler bei innerstädtischen Verkehrsunfällen passieren den Fußgänger:innen beim Überqueren einer Fahrbahn [1]. Solche Unfälle können entstehen, weil die herannahenden Fahrzeuge falsch eingeschätzt werden. Die Zeit, bis ein Fahrzeug den eigenen Standpunkt erreicht (Kontaktzeit, TTC: Time-to-contact), wird überschätzt und es kommt zu riskanten Querungsentscheidungen. Die präzise Einschätzung der Fahrzeuge ist bereits bei konstanten Geschwindigkeiten schwierig [2]. Im innerstädtischen Verkehr kommt es jedoch oft vor, dass Fahrzeuge beschleunigen, um beispielsweise eine grüne Ampelphase zu erreichen. Durch die erhöhte Drehzahl eines Verbrennungsmotors können Fußgänger:innen dies in der Regel gut auditiv wahrnehmen. („Auditiv" bezeichnet die Wahrnehmung von Geräuschen, „akustisch" die physikalischen Aspekte von Geräuschen, „audiovisuell" bezeichnet die kombinierte auditive und visuelle Wahrnehmung.) Elektrofahrzeuge hingegen können sehr sportlich beschleunigen, aber ohne die vom Verbrennungsmotor gewohnten Geräusche abzugeben.

Seit Juli 2021 müssen alle neu zugelassenen Hybrid- und Elektrofahrzeuge über ein AVAS (Acoustic Vehicle Alerting System) verfügen (EU-Verordnung) [3]. Das System muss bei geringen Geschwindigkeiten Warntöne erzeugen, die eine akustische Detektierbarkeit der Elektrofahrzeuge auf ähnlichem Niveau wie für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor sicherstellen. Bei einer Geschwindigkeit von 20 Kilometern pro Stunde darf dieses System laut Verordnung abgeschaltet werden, da man davon ausgeht, dass bei höheren Geschwindigkeiten die Reifen und nicht mehr der Motor den wesentlichen Anteil der Geräusche beim Fahren verursachen. Der Verordnung nach soll das AVAS einen Mindestschalldruckpegel erreichen und auf das Fahrzeugverhalten, wie Beschleunigungen oder Rückwärtsfahren hinweisen [3]. Zudem muss sich mit jedem Gang der Frequenzbereich proportional zur Geschwindigkeit ändern [3]. Dabei ist nicht präzise vorgeschrieben, wie genau das AVAS klingen soll. Es gibt bislang jedoch keine Befunde, wie gut Fußgänger:innen bei Überquerungsentscheidungen die Beschleunigung von Elektrofahrzeugen (mit und ohne AVAS) im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor berücksichtigen können.

Projektziel

Das Ziel des vorliegenden Forschungsprojektes war es, zu untersuchen, wie gut die Beschleunigung von Elektrofahrzeugen (mit und ohne AVAS) im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor wahrgenommen wird. Daraus sollen Schlussfolgerungen gezogen werden, ob mit der steigenden Zahl von Elektrofahrzeugen neue Gefahren, besonders für Fußgänger:innen, zu erwarten sind. Der ausführliche Forschungsbericht Nr. 76 „Risiko hohe Beschleunigung? Straßenüberquerungsverhalten von Fußgänger:innen in Interaktion mit Elektrofahrzeugen (mit und ohne AVAS) im Vergleich zu Verbrennern" ist auf udv.de verfügbar [4].

Im Auftrag der Unfallforschung der Versicherer (UDV) führte die Johannes Gutenberg-Universität Mainz **drei Experimente** zur kombinierten visuellen und auditiven Wahrnehmung von Fahrzeugen in einem städtischen Straßenüberquerungsszenario durch. Im Mittelpunkt stand jeweils der Vergleich zwischen Elektrofahrzeugen (mit und ohne AVAS) und Verbrennern, insbesondere in Situationen, in denen das sich den Fußgänger:innen nähernde Fahrzeug beschleunigt.

Im **ersten Experiment** wurde die Wahrnehmung der Kontaktzeit von Elektrofahrzeugen im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor untersucht. Die Versuchspersonen sollten einschätzen, wann das Fahrzeug ihren eigenen Standort erreichen würde.

Im **zweiten Experiment** wurde das Verhalten von Fußgänger:innen anhand von Querungsentscheidungen untersucht. Die Versuchspersonen sollten angeben, ob sie die Straße noch vor einem herannahenden Fahrzeug überqueren würden oder nicht.

Im **dritten Experiment** wurde untersucht, ob die Beschleunigung der Fahrzeuge erkannt wird (Detektion). Die Versuchspersonen sollten einschätzen, ob ein sich näherndes Fahrzeug beschleunigt oder mit konstanter Geschwindigkeit fährt.

Diese drei Experimente wurden in der vorliegenden Untersuchung kombiniert, um die Rolle der Fahrgeräusche aus verschiedenen, für eine Straßenüberquerung von Fußgänger:innen relevanten, Perspektiven zu untersuchen.

Audiovisuelles Virtual-Reality-System

Um die Rolle von Fahrzeuggeräuschen bei der Wahrnehmung von Beschleunigungen möglichst realitätsnah experimentell untersuchen zu können, wurde ein bislang einmaliges audiovisuelles Virtual-Reality-Simulationssystem geschaffen (Abb. 1).

Auf einer Teststrecke wurden dafür Audioaufnahmen verschiedener Fahrzeuge aufgezeichnet:

- **A** eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor (Kia Rio 1.0 T-GDI 120),
- **B** eines Elektrofahrzeuges ohne AVAS (Kia e-Niro, AVAS ausgeschaltet) und
- **C** des gleichen Elektrofahrzeuges mit AVAS (Kia e-Niro, AVAS eingeschaltet).

Das Geräusch des im Fahrzeug verbauten AVAS entsprach den Anforderungen der AVAS-Richtlinie [3]. Im Gegensatz dazu war es aber abschaltbar. Falls aktiviert, war es bis zu einer Geschwindigkeit von 28 Kilometern pro Stunde aktiv.

Mehrere Mikrophone an den Fahrzeugen und an der Strecke zeichneten die Fahrgeräusche auf. Die Fahrzeugpositionen wurden dabei mittels hochpräzisem GPS erfasst. Zur Erfassung von Fahrzeuggeräuschen bei unterschiedlichen Geschwindigkeitsprofilen fuhren die Fahrzeuge jeweils mit verschiedenen konstanten Geschwindigkeiten sowie niedriger und hoher Beschleunigung. Tabelle 1 gibt eine Übersicht der angestrebten Geschwindigkeitsprofile. Nach eingehender Qualitätskontrolle und dem Ausschluss beispielsweise von Aufnahmen mit lauten Hintergrundgeräuschen wurden 93 geeignete Aufnahmen ausgewählt.



Abbildung 1 · Audiovisuelles virtual reality system: (links) Aufbau der 16 Lautsprecher im Labor und visuelle Präsentation der Straßenszene mit Fahrzeug; (rechts) Versuchsperson mit VR-Brille

Angestrebte Geschwindigkeitsprofile

Tabelle 1 · bei Konstantfahrten, bei geringer und bei hoher Beschleunigung

	Konstantfahrten					Geringe Beschleunigung				Hohe Beschleunigung			
Beschleunigung in m/s²	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.6	0.6	0.6	2.0	2.0	2.0	2.0
Geschwindigkeit in km/h	10	20	30	40	50	10	20	30	40	10	20	30	40

Durch die fahrtechnische Umsetzung (z.B. manuelle Fahrzeugsteuerung, Schaltvorgänge etc.) ließen sich die angestrebten Geschwindigkeitsprofile nicht in jedem Fall exakt umsetzen. Bei der Auswertung wurden daher die real gefahrenen Geschwindigkeitsprofile nicht direkt miteinander verglichen (z.B. durch statistische Unterschiedstests). Stattdessen wurden Regressionsmodelle genutzt. Diese Modelle sagen die Parameter für Wahrnehmung, Verhalten und Detektion für die angestrebten Geschwindigkeitsprofile statistisch vorher. In diese Modelle gehen die real gefahrenen Geschwindigkeitsprofile und der Fahrzeugtyp (mit den drei Varianten) als separate Faktoren ein. Damit konnte der Einfluss des Fahrzeugtyps von einem möglichen Einfluss der fahrtechnischen Umsetzung separiert und letzterer somit kontrolliert werden. Vergleichende Auswertungen mittels statistischer Unterschiedstests zeigen vergleichbare Ergebnisse (vgl. [4]).

Im Labor wurde mittels 16 Lautsprechern in einem kreisförmigen Aufbau (Abb. 1) ein räumliches Schallfeld erzeugt. Mit dessen Hilfe hörten die Versuchspersonen eine realistische räumliche akustische Simulation der sich ihnen nähernden Fahrzeuge und ein Hintergrundgeräusch einer ruhigen Wohngegend. Zusätzlich wurde den Versuchspersonen eine visuelle Umgebung über eine Virtual-Reality-Brille präsentiert, die eine innerstädtische, zweistreifige Straße ohne weiteren Verkehr oder Verkehrsteilnehmer:innen zeigte (Abb. 1). Auf der Straße wurde ein Fahrzeug mit einem Fahrer präsentiert. Die Kopfbewegungen der Versuchspersonen wurden durch das laserbasierte Tracking der Virtual-Reality-Brille erfasst, so dass diese sich in der virtuellen Szene umsehen konnten.

Alle teilnehmenden Versuchspersonen verfügten über eine gute Seh- und Hörfähigkeit, die im Vorfeld getestet wurde.

Kontaktzeitschätzung

Im ersten Experiment sollten die Versuchspersonen die Kontaktzeit der Fahrzeuge einschätzen. Das ist die Zeit, zu der das Fahrzeuge auf der Höhe der Versuchspersonen ankommen wird. Die präzise Schätzung der Kontaktzeit ist besonders wichtig für die Vorbereitung einer Straßenquerung.

Methodik

In der Simulation standen die Versuchspersonen am Rand einer zweispurigen Straße (vgl. Abb. 1). Das stehende Fahrzeug war auf der Fahrspur links zu sehen. Mit einem Knopfdruck der Versuchsperson fuhr das Fahrzeug los, beschleunigte gegebenenfalls nach zwei Sekunden und wurde nach insgesamt fünf Sekunden Sicht- und Hörbarkeit ausgeblendet. Die Versuchspersonen sollten daraufhin eine Taste an dem Controller drücken, wenn das Fahrzeug ihrer Meinung nach die eigene Position erreicht hätte, wenn es sich mit derselben konstanten Geschwindigkeit beziehungsweise derselben Beschleunigung wie in der sicht- und hörbaren Phase weiter auf sie zubewegt hätte. Diese Versuchsmethode ist in der Forschung zur Kontaktzeitschätzung etabliert und vielfach erprobt (z.B. [2]).

Präsentiert wurden die verschiedenen Geschwindigkeitsprofile wie in Tabelle 1 dargestellt und in Kapitel 2 beschrieben. Die Kontaktzeit wurde definiert als Zeit ab Ausblenden des Fahrzeuges bis zum Erreichen des Standpunktes der Versuchsperson. Für jeden Fahrzeugtyp und jedes der Geschwindigkeitsprofile wurden Kontaktzeiten von 2,0 Sekunden 3,5 Sekunden und 5,0 Sekunden dargeboten. Das Fahrzeug hätte also zum Zeitpunkt des Abblendens unterschiedlich lange gebraucht, um am Standpunkt der Versuchsperson anzukommen. Jede dieser 93 Kombinationen wurde den Versuchspersonen randomisiert in je sieben Durchgängen dargeboten. Das Experiment dauerte insgesamt etwa fünf Stunden pro Versuchsperson, mit entsprechenden Vorbereitungs- und Pausenzeiten.

Insgesamt nahmen 30 Personen am ersten Experiment teil. 25 davon waren Frauen, 5 Männer. Sie waren zwischen 18 und 63 Jahre alt (M = 26,37 Jahre, SD = 8,87 Jahre).

Ergebnisse

Zusammenfassend zeigte sich, dass die Kontaktzeiten der Elektrofahrzeuge bei **Beschleunigung** (mit und ohne AVAS) signifikant länger eingeschätzt und eher überschätzt wurden als für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor. Das bedeutet, dass die Zeit bis zum Eintreffen des Fahrzeugs am eigenen Standort als länger eingeschätzt wurde, als sie tatsächlich war. Eine solche Schätzung könnte zu knapperen Straßenüberquerungen vor herannahenden Elektrofahrzeugen im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor führen.

In Abbildung 2 sind am Beispiel der Ausgangsgeschwindigkeit von zehn Kilometern pro Stunde die geschätzten Kontaktzeiten dargestellt, wie sie von dem, auf Grundlage der Versuchsdaten formulierten Regressionsmodell, vorhergesagt wurden. Auf der x-Achse ist die Beschleunigung in Meter pro Sekunde zum Quadrat abgetragen, auf der y-Achse die von den Versuchspersonen geschätzte Kontaktzeit. Die tatsächlichen Kontaktzeiten, zu denen das Fahrzeug wirklich die Position der Versuchsperson erreicht hätte, ist im Diagramm durch die rosa gestrichelten Linien dargestellt (oben 2 s, Mitte 3,5 s, unten 5 s). Die drei Grafiken zeigen demnach die Ergebnisse für unterschiedliche zeitliche Abstände der Fahrzeuge zum Standort der Versuchsperson zum Zeitpunkt des Abblendens. Bei einer tatsächlichen Kontaktzeit von fünf Sekunden waren die Fahrzeuge zeitlich weiter entfernt als bei geringeren Kontaktzeiten. Zu erkennen ist, dass die Kontaktzeitschätzungen für das Fahrzeug mit Verbrennungsmotor (blaue Linie) nahe an der tatsächlichen Kontaktzeit (rosa gestrichelte Linie) liegen. Das Elektrofahrzeug ohne AVAS (rote Linie) wurde hingegen eher so eingeschätzt, als würde es ab dem Zeitpunkt des Abblendens mit einer konstanten Geschwindigkeit weiterfahren und nicht beschleunigen. Die Beschleunigung wird nicht adäquat berücksichtigt. Mit zunehmender Beschleunigung und mit zunehmender tatsächlicher Kontaktzeit wurde die Kontaktzeit immer stärker überschätzt. Die Beschleunigung des Elektrofahrzeugs mit AVAS (grüne Linie) wurde etwas besser bei der Kontaktzeitschätzung berücksichtigt, jedoch nicht so gut, wie für das Fahrzeug mit Verbrennungsmotor. Der Unterschied zwischen der überschätzten Kontaktzeit für die Elektrofahrzeuge und der präziser geschätzten Kontaktzeit für das Fahrzeug mit Verbrennungsmotor wurde mit zunehmender Beschleunigung und längeren tatsächlichen Kontaktzeiten stärker.

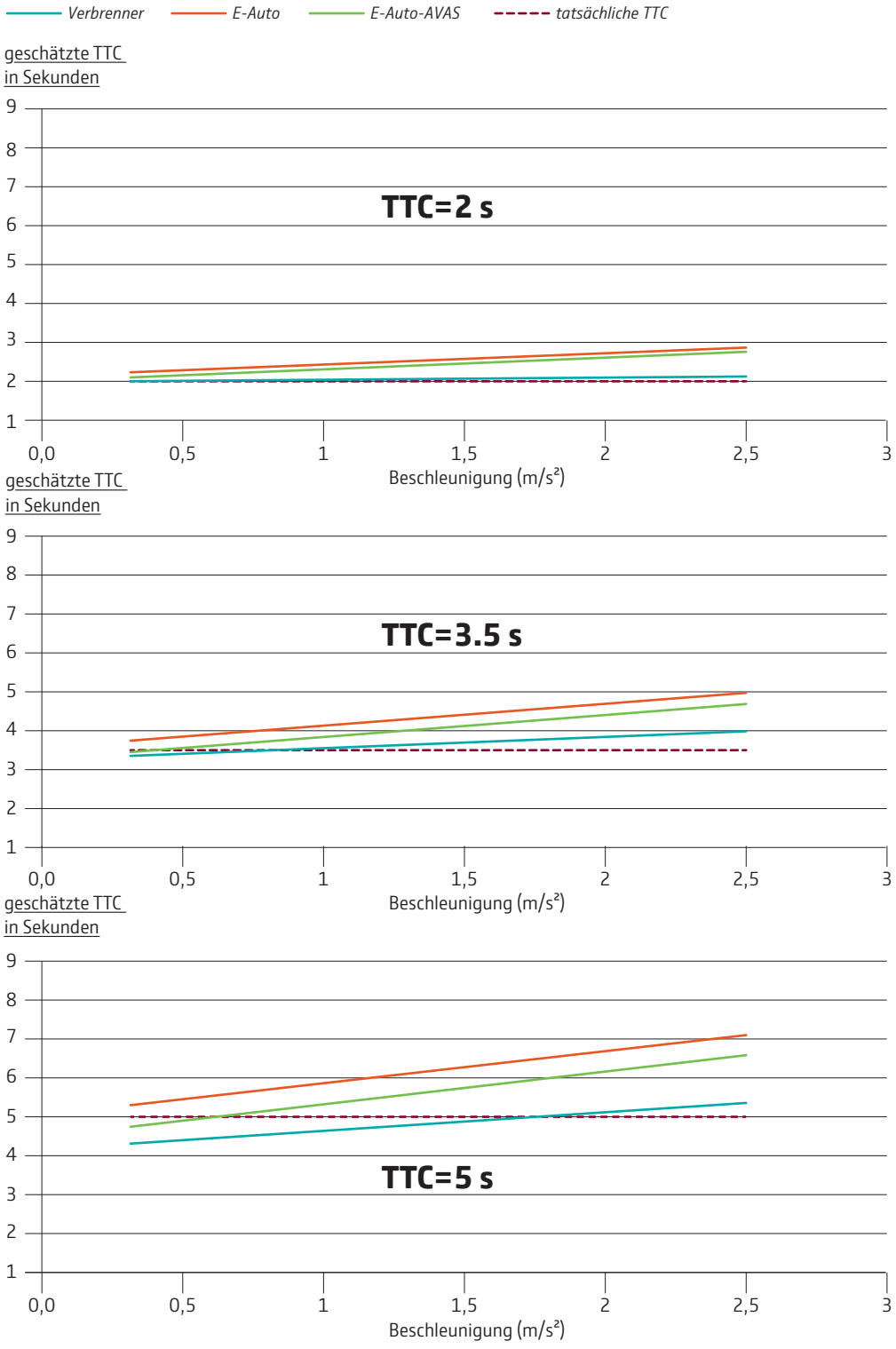
Bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von 20 Kilometern pro Stunde zeigte sich ein ähnliches Bild (ohne Abbildung).

Die Ergebnisse zeigen, dass bei Beschleunigungsfahrten die akustischen Informationen (Fahrgeräusche) zur Einschätzung der Kontaktzeit genutzt werden. Das Elektrofahrzeug (mit und ohne AVAS) vermittelt Informationen zur Beschleunigung offenbar nicht so gut wie das Fahrzeug mit Verbrennungsmotor. Das AVAS verbessert die Kontaktzeitschätzungen zwar leicht, sie erreichen jedoch nicht das Niveau des Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor.

Bei **konstanten Geschwindigkeiten** wurden die Kontaktzeiten der verschiedenen Fahrzeuge ähnlich eingeschätzt. Es bestanden keine signifikanten Unterschiede zwischen den Kontaktzeitschätzungen für das Elektrofahrzeug (mit oder ohne AVAS) und für das Fahrzeug mit Verbrennungsmotor. Das bedeutet, dass bei konstanter Geschwindigkeit die akustischen Unterschiede zwischen Elektrofahrzeug und Fahrzeug mit Verbrennungsmotor keine bedeutende Rolle für die Schätzungen der Kontaktzeit spielen.

Kontaktzeitschätzungen bei Beschleunigungen

***Abbildung 2* · Beschleunigung bei Ausgangsgeschwindigkeit: 10 km/h, tatsächliche Kontaktzeiten: 2 s, 3,5 s und 5 s**



© UDV 2022

Straßenquerungsentscheidungen

Die Ergebnisse des ersten Experimentes zeigen, dass die Kontaktzeit von beschleunigenden Elektrofahrzeugen überschätzt wird. Die Versuchspersonen gingen im Mittel davon aus, dass das Fahrzeug zum Zeitpunkt der Schätzung noch länger bis zum Erreichen ihrer Position benötigen würde, als es tatsächlich der Fall war. Dies könnte zu riskanteren Querungsentscheidungen führen. Welche Querungsentscheidungen Versuchspersonen wirklich in Interaktion mit beschleunigenden Elektrofahrzeugen und Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor treffen, wurde daher im zweiten Experiment untersucht.

Methodik

Im zweiten Experiment standen die Versuchspersonen wieder an einer (simulierten) Straße in einem innerstädtischen Umfeld. Direkt gegenüber der Versuchsperson befand sich auf der anderen Straßenseite eine Tür. Eine gerade Linie zwischen dem Standpunkt der Versuchsperson und der Tür verdeutlichte den Querungsweg. Das herannahende Fahrzeug startete die Fahrt auf einen Knopfdruck hin und wurde nach einer Darbietungszeit von fünf Sekunden ausgeblendet. Die Versuchsperson sollte dann mittels Knopfdruck entscheiden, ob sie die Straße zum Zeitpunkt des Abblendens noch vor dem Fahrzeug überquert hätte oder nicht. Im Verlauf des Experiments wurden verschiedene Kontaktzeiten zum Zeitpunkt des Abblendens dargeboten. Aus dem, anhand dieser Versuchsdaten ersichtlichen Zusammenhang zwischen der Kontaktzeit zum Zeitpunkt des Abblendens und einer positiven Überquerungsentscheidung, wurde die Kollisionswahrscheinlichkeit bestimmt. Unter der Annahme, dass das Fahrzeug nicht in Reaktion auf einen Fußgänger abbremsen würde (worst-case-scenario), würde es zu einer Kollision zwischen Fahrzeug und Fußgänger:in kommen, wenn die Kontaktzeit beim Abblenden kürzer als die für die Querung der Straße notwendigen Zeit ist. Für die Berechnung der Kollisionswahrscheinlichkeit aus den Verhaltensdaten wurde im Vorfeld die mittlere Querungsdauer jeder Versuchsperson auf einer Strecke ermittelt, die der Länge der Straßenüberquerung in der Simulation entsprach. Anhand der individuellen Querungsdauer und des im Experiment gemessenen Zusammenhangs zwischen der Kontaktzeit zum Zeitpunkt des Abblendens und einer positiven Überquerungsentscheidung konnte nun berechnet werden, wie wahrscheinlich eine Kollision gewesen wäre.

Das Fahrzeug mit Verbrennungsmotor sowie die Elektrofahrzeuge (mit oder ohne AVAS) näherten sich, wie im ersten Experiment, mit einer Auswahl der konstanten Geschwindigkeiten oder Beschleunigungen (sh. Geschwindigkeitsprofile in Tab. 1). Insgesamt wurden zwischen 1.261 und 1.701 Durchgänge in zufälliger Reihenfolge präsentiert. Das Experiment dauerte pro Versuchsperson insgesamt etwa fünfeinhalb Stunden.

Am zweiten Experiment nahmen insgesamt 25 Personen teil. 18 davon waren Frauen, 7 Männer (Alter M = 22,84 Jahre, SD = 3,87 Jahre).

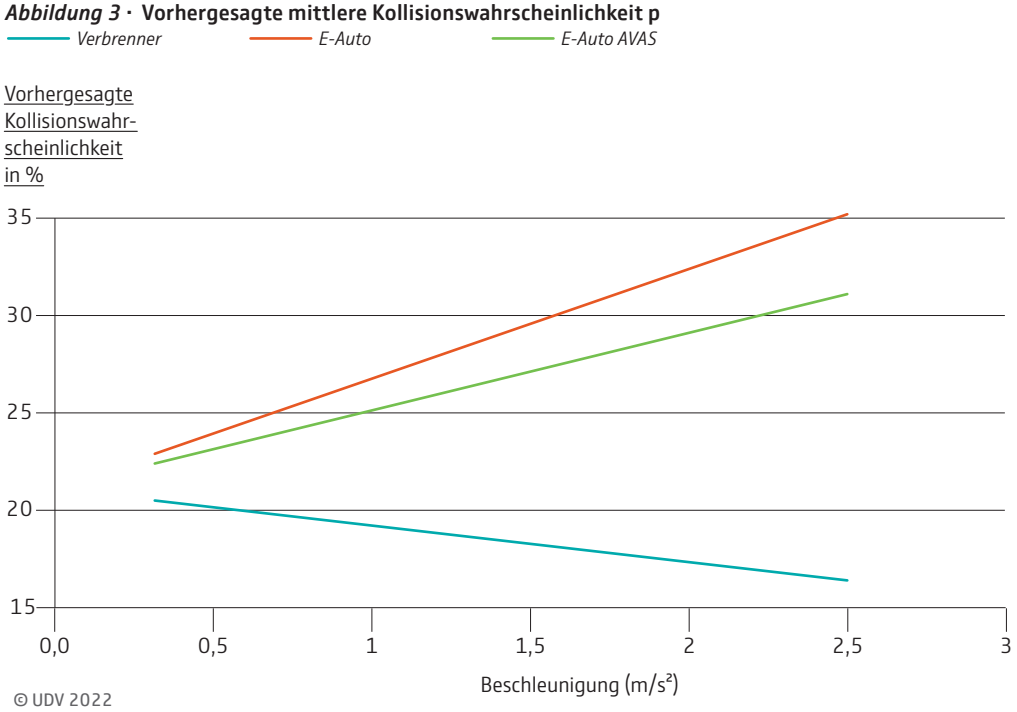
Ergebnisse

Zusammengefasst zeigten sich bei Beschleunigung höhere Kollisionswahrscheinlichkeiten für die Elektrofahrzeuge (mit und ohne AVAS) als für das Fahrzeug mit Verbrennungsmotor.

In Abbildung 3 ist auf der x-Achse erneut die Beschleunigung in Metern pro Sekunde zum Quadrat veranschaulicht. Auf der y-Achse ist die mittlere Kollisionswahrscheinlichkeit in Prozent abgetragen, wie sie vom an die Versuchsdaten angepassten Regressionsmodell vorhergesagt wird. Für das Fahrzeug mit Verbrennungsmotor (blaue Linie) war die Kollisionswahrscheinlichkeit geringer als für die Elektrofahrzeuge und stieg nicht mit der Beschleunigung an. Die Kollisionswahrscheinlichkeiten waren für das Elektrofahrzeug mit AVAS (grüne Linie) geringer als für das Elektrofahrzeuges ohne AVAS (rote Linie), aber immer noch signifikant höher als die des Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor (blaue Linie). Im Gegensatz zum Fahrzeug mit

Kollisionswahrscheinlichkeit bei Beschleunigung

Abbildung 3 · **Vorhergesagte mittlere Kollisionswahrscheinlichkeit p**



Verbrennungsmotor stieg bei den Elektrofahrzeugen (mit und ohne AVAS) die Kollisionswahrscheinlichkeit signifikant mit zunehmender Beschleunigung an. Die im Experiment beobachteten Kollisionswahrscheinlichkeiten sind insgesamt höher, als sie vermutlich im Realverkehr wären. Die Versuchspersonen haben in der objektiv ungefährlichen Laborsituation womöglich riskantere Querungsentscheidungen getroffen, als sie es im Realverkehr tun würden. Zur Interpretation der Effekte werden daher nur die Relationen zwischen den Fahrzeugarten herangezogen, nicht die absoluten Werte. Es ist davon auszugehen, dass bei hohen Beschleunigungen riskantere Querungsentscheidungen bei Interaktion mit Elektrofahrzeugen (mit und ohne AVAS) getroffen werden als bei Interaktion mit Fahrzeugen, die mit einem Verbrennungsmotor ausgerüstet sind.

Für alle Konstantfahrten lag die Kollisionswahrscheinlichkeit unter 20 Prozent. Weder die Fahrzeugarten noch die Geschwindigkeiten zeigten einen signifikanten Effekt auf die Kollisionswahrscheinlichkeit.

Detektion von Beschleunigung

Eine mögliche Erklärung für die Effekte aus dem ersten und zweiten Experiment wäre, dass die Beschleunigung der Elektrofahrzeuge nicht erkannt wird, weil die entsprechenden charakteristischen Motorengeräusche, so wie sie bei einem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor auftreten, fehlen. Um dies zu untersuchen, wurde im dritten Experiment die Detektion von Beschleunigung untersucht.

Methodik

Im dritten Experiment wurden den Versuchspersonen in jedem Durchgang zwei Fahrzeuge im Abstand von einer Sekunde je drei Sekunden lang präsentiert. Ein Fahrzeug davon beschleunigte und das andere fuhr mit konstanter Geschwindigkeit. Die Versuchspersonen sollten nach der Präsentation mittels Tastendruck entscheiden, welches der beiden beschleunigt hatte. In der Auswertung wurde der Anteil korrekter Antworten betrachtet. Ein Wert von 1,0 entspricht einer Beschleunigungsdetektionsleistung von 100 Prozent. Die Versuchsperson hätte das beschleunigende Fahrzeug in allen Versuchsdurchgängen korrekt erkannt. Ein Wert von 0,5 entspricht der Ratewahrscheinlichkeit von 50 Prozent, da es jeweils nur zwei mögliche Antworten gab.

Die Elektrofahrzeuge (mit und ohne AVAS) und das Fahrzeug mit Verbrennungsmotor wurden in einer Auswahl an Geschwindigkeitsprofilen aus Tabelle 1 präsentiert, die sowohl Beschleunigung als auch konstante Geschwindigkeiten enthielt. Zusätzlich wurden die Fahrzeuge entweder nur visuell, also mit visueller VR-Simulation aber ohne Fahrgeräusche, oder audiovisuell, d.h. mit visueller VR-Simulation und Fahrgeräuschen, präsentiert.

Insgesamt wurden jeder Versuchspersonen 896 Durchgänge in zufälliger Reihenfolge präsentiert. Das Experiment dauerte pro Versuchsperson etwa fünf Stunden.

Am dritten Experiment nahmen 14 Personen teil, davon neun Frauen und fünf Männer. Sie waren im Mittel 24,43 Jahre alt (SD = 4,29 Jahre).

Ergebnisse

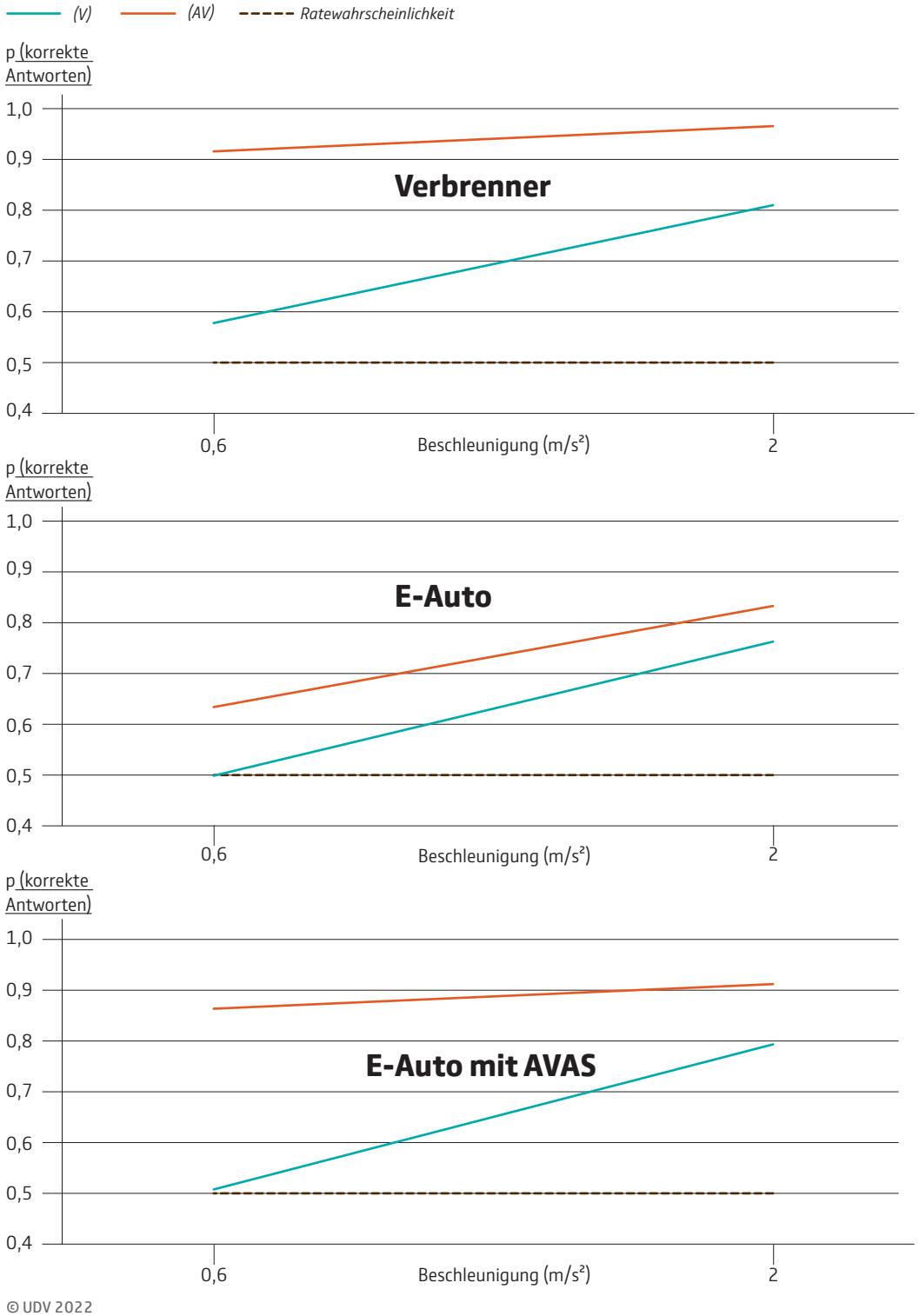
Die Ergebnisse sind in Abbildung 4 und 5 dargestellt. Auf der y-Achse ist die Trefferrate der Beschleunigungsdetektion dargestellt. Höhere Werte bedeuten also eine bessere Erkennung der Beschleunigung. Die untere horizontale Linie (p = 0,5) repräsentiert die Ratewahrscheinlichkeit. Auf der x-Achse ist die Beschleunigung abgetragen (in m/s^2, niedrig oder hoch). Die blauen Linien stellen die Ergebnisse bei rein visueller Darbietung dar, die roten Linien bei audiovisueller Darbietung. In Abbildung 4 sind in der oberen Grafik die Ergebnisse für das Fahrzeug mit Verbrennungsmotor abgebildet, in der Mitte die Ergebnisse für das Elektrofahrzeugs ohne AVAS und unten für das Elektrofahrzeug mit AVAS.

Bei der **niedrigeren Beschleunigung** (0,6 m/s^2; 10 km/h Ausgangsgeschwindigkeit) in der rein visuellen Präsentation lagen die Detektionsleistungen aller Fahrzeuge nah an der Ratewahrscheinlichkeit oder entsprach ihr sogar (Abb. 4; blau). Rein visuell (ohne Fahrzeuggeräusche) waren die niedrigen Beschleunigungen demnach kaum zu erkennen. Dies steht im Einklang mit früheren Studien (z.B. [5]). Die audiovisuelle Darbietung (rot) verbesserte die Beschleunigungsdetektion signifikant. Am stärksten zeigte sich dieser Effekt für das Fahrzeug mit Verbrennungsmotor, gefolgt vom Elektrofahrzeug mit AVAS. Wenn zusätzlich die Fahrzeuggeräusche dargeboten wurden, wurde die Beschleunigung des Fahrzeuges mit Verbrennungsmotor in rund 90 Prozent der Fälle erkannt, die des Elektrofahrzeuges mit AVAS in rund 85 Prozent. Die Beschleunigung des Elektrofahrzeuges ohne AVAS (Mitte) wurde hingegen in lediglich rund 65 Prozent der Fälle erkannt. Die Beschleunigung des Elektrofahrzeuges ohne AVAS wurde demnach signifikant schlechter erkannt als die des Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor und des Elektrofahrzeugs mit AVAS. Das AVAS zeigt demnach besonders bei niedrigen Beschleunigungen einen positiven Effekt, da die Beschleunigung häufiger erkannt wird.

Bei der **höheren Beschleunigung** (2 m/s^2; 10 km/h Ausgangsgeschwindigkeit) wurde auch in der rein visuellen Darbietung die Beschleunigung relativ gut erkannt. In der Abbildung 4 ist dies daran zu erkennen, dass die Antwortgüte bei rein visueller Darbietung (blaue Punkte) deutlich über der Ratewahrscheinlichkeit lag und höher als bei der niedrigen Beschleunigung (0,6 m/s^2) war. Kamen zusätzlich die Fahrzeuggeräusche hinzu, verbesserte sich die Detektionsleistung (rot). Abermals erkannten die Versuchspersonen hier die Beschleunigung beim Fahrzeug mit Verbrennungsmotor am besten, gefolgt vom Elektrofahrzeug mit AVAS. Die Beschleunigung des Elektrofahrzeuges ohne AVAS wurde am wenigsten gut erkannt. Der Unterschied zwischen der Beschleunigungsdetektionsleistung für die Elektrofahrzeuge mit bzw. ohne AVAS war jedoch bei der höheren Beschleunigung statistisch nicht signifikant.

Beschleunigungsdetektion

Abbildung 4 **· Wahrscheinlichkeit der Beschleunigungsdetektion p (korrekte Antworten) bei niedriger und hoher Beschleunigung; Ausgangsgeschwindigkeit: 10 km/h, rein visuelle Darstellung (V), audiovisuelle Darstellung (AV)**



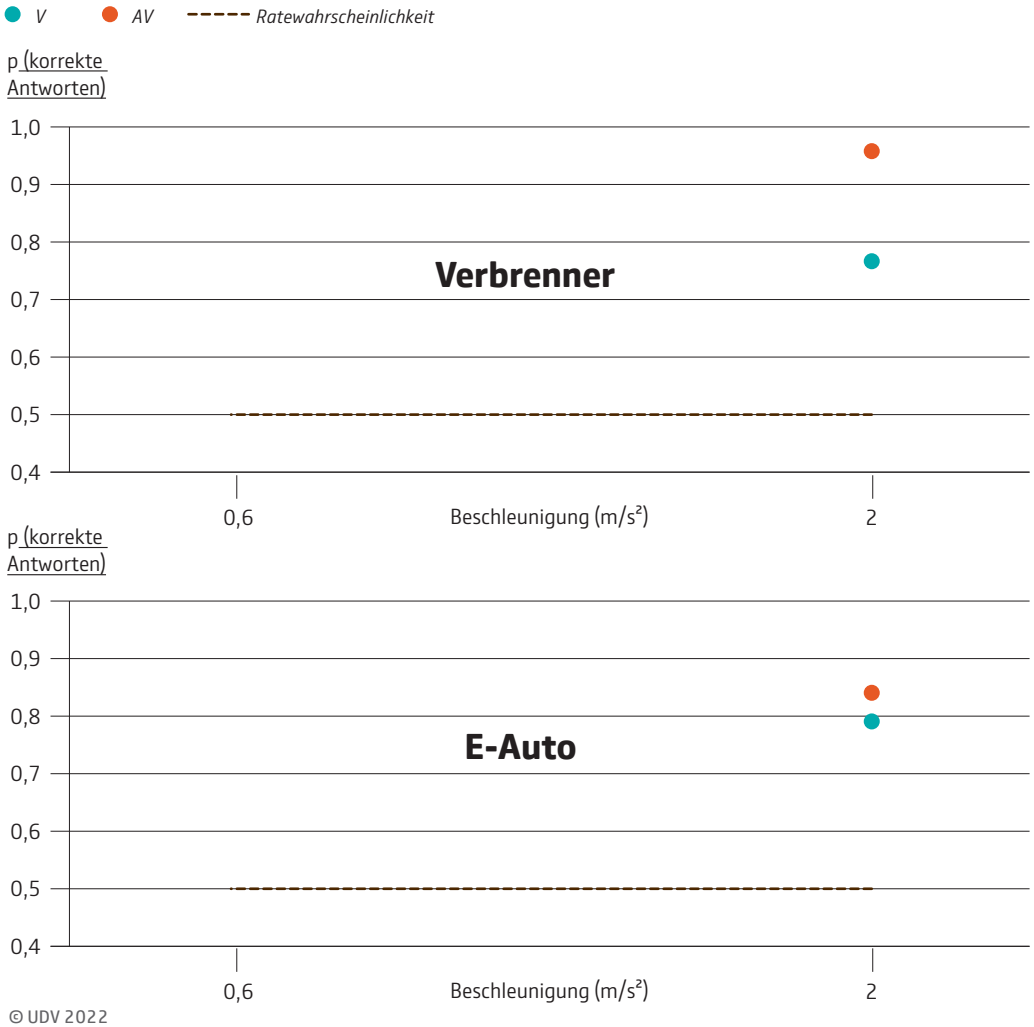
© UDV 2022

Ein ähnliches Bild zeigte sich auch für die **hohe Beschleunigung** bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von 30 Kilometern pro Stunde (Abb. 5). Hier ist nur der Vergleich zwischen dem Elektrofahrzeug ohne AVAS und dem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor enthalten, da das AVAS im Testfahrzeug nur bei Geschwindigkeiten bis 28 Kilometern pro Stunde aktiv war. Bei audiovisueller Präsentation (rot) wurde die Beschleunigung von den Versuchspersonen häufiger erkannt als bei rein visueller Präsentation (blau). Dieser Effekt war für das Fahrzeug mit Verbrennungsmotor stärker als für das Elektrofahrzeug.

Zusammenfassend erkannten die Versuchspersonen die Beschleunigung signifikant besser bei audiovisueller Präsentation, wenn also neben den visuellen Informationen auch die Fahrgeräusche dargeboten wurden, als bei der rein visuellen Präsentation. Dabei gab es zwischen den Fahrzeugen jedoch Unterschiede im Ausmaß der Verbesserung. Während die Beschleunigung des Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor anhand der Fahrzeuggeräusche viel

Detektion hoher Beschleunigung

Abbildung 5 · **Wahrscheinlichkeit der Beschleunigungsdetektion p (korrekte Antworten) bei hoher Beschleunigung; Ausgangsgeschwindigkeit: 30 km/h, rein visuelle (V) und audiovisuelle Darbietung (AV)**



© UDV 2022

besser erkannt wurde, verbesserte sich die Detektionsleistung für das Elektrofahrzeug ohne AVAS deutlich geringer. Bei niedrigerer Beschleunigung waren diese Unterschiede stärker. Ohne AVAS ist die Beschleunigung eines Elektrofahrzeuges also schlechter zu erkennen. Mit AVAS ist die Beschleunigung signifikant besser zu erkennen als ohne, zumindest bei geringer Beschleunigung. Sie wird zwar nicht so gut erkannt wie bei einem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor, aber besser als bei einem Elektrofahrzeug ohne AVAS.

Zusammenfassung und Diskussion

In der vorliegenden Studie wurde erstmals ein audiovisuelles Virtual-Reality-System verwendet, in dem die Fahrgeräusche verschiedener Fahrzeuge in einer Straßenüberquerungssituation realitätsnah dargeboten werden konnten. Mittels dieses Systems konnte erstmalig aus der Perspektive von Fußgänger:innen die audiovisuelle Wahrnehmung von Elektrofahrzeugen mit und ohne AVAS im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor untersucht werden.

Bei Fahrten mit **konstanter Geschwindigkeit** zeigten sich kaum Unterschiede zwischen Elektrofahrzeugen mit und ohne AVAS und dem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor. Die Kontaktzeitschätzungen lagen nah an den tatsächlichen Kontaktzeiten. Auch im Querungsverhalten der Fußgänger:innen zeigten sich kaum Unterschiede zwischen den Fahrzeugtypen. Die Unterschiede in den Fahrgeräuschen spielten also keine wesentliche Rolle.

Bei **Beschleunigung** wurden die Kontaktzeiten der Elektrofahrzeuge jedoch deutlich überschätzt, während die Kontaktzeitschätzungen beim Fahrzeug mit Verbrennungsmotor genauer waren (Experiment 1). Eine Überschätzung der Kontaktzeit könnte zu riskanten Situationen im Straßenverkehr führen, weil die Fahrzeuge von Fußgänger:innen als später eintreffend eingeschätzt werden, als sie es tatsächlich sind. Die Ergebnisse zeigen, dass die Beschleunigung von Elektrofahrzeugen bei der Kontaktzeitschätzung nicht adäquat berücksichtigt wird. Stattdessen werden die Kontaktzeiten so eingeschätzt, als würden die Fahrzeuge mit konstanter Geschwindigkeit weiterfahren. Das AVAS verbesserte die Schätzungen zwar, erreichte aber nicht das Niveau des Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor. Das spiegelte sich auch im Querungsverhalten der Fußgänger:innen wider (Experiment 2). Vor beschleunigenden Elektrofahrzeugen (mit und ohne AVAS) wurden riskantere Querungsentscheidungen getroffen als vor dem beschleunigenden Fahrzeug mit Verbrennungsmotor, auch bei höheren Geschwindigkeiten. Die Kollisionswahrscheinlichkeit war bei hoher Beschleunigung um bis zu 10 Prozent höher als beim Fahrzeug mit Verbrennungsmotor. Das AVAS mildert diesen Effekt zwar ab, die Kollisionswahrscheinlichkeit war aber immer noch signifikant höher als bei dem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor. Auch in Situationen, in denen Fußgänger:innen die Fahrzeuge gut sehen können, nutzen sie also zusätzlich akustische Informationen zur Einschätzung der Beschleunigung von Fahrzeugen. Bei beschleunigenden Elektrofahrzeugen (mit und ohne AVAS) sind diese akustischen Informationen offenbar unzureichend. Fußgänger:innen können sie schlechter interpretieren und treffen in der Folge riskantere Querungsentscheidungen.

Die ungenaueren Kontaktzeitschätzungen und riskanteren Querungsentscheidungen könnten zumindest teilweise darauf zurückzuführen sein, dass die Beschleunigungen von Elektrofahrzeugen, vor allem ohne AVAS, nicht erkannt werden (Experiment 3). Die Beschleunigungen von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor und Elektrofahrzeug mit AVAS wurden jedoch ähnlich gut erkannt. Da für Elektrofahrzeuge mit AVAS aber die Kontaktzeitschätzung ungenauer und die Querungsentscheidungen riskanter waren als für das Fahrzeug mit Verbrennungsmotor, ist anzunehmen, dass eine präzise Einschätzung nicht ausschließlich vom Erkennen der Beschleunigung abhängt. Das AVAS trägt also zur

Erkennung der Beschleunigung bei. Es fließen aber darüber hinaus offensichtlich noch weitere Informationen in die Einschätzung der Bewegungen des Fahrzeuges ein, die bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor besser nutzbar sind als bei Elektrofahrzeugen.

Einschränkend muss angemerkt werden, dass in der vorliegenden Studie nur ein einziges Fahrzeugmodell und somit auch nur ein spezifisches AVAS betrachtet wurde. Die Bandbreite der AVAS-Varianten ist jedoch aufgrund des zu Beginn beschriebenen Gestaltungsspielraums groß. Ob und wie sich verschiedene Umsetzungen der UNECE R138 Vorgaben möglicherweise auch auf die Wahrnehmung in Überquerungssituationen auswirken, muss in Zukunft untersucht werden.

Die Versuchspersonen der vorliegenden Studie verfügten über eine gute Seh- und Hörfähigkeit. Im Straßenverkehr sind jedoch auch Personen mit entsprechenden Einschränkungen unterwegs. Besonders für Personen mit eingeschränkter Sehfähigkeit könnte die akustische Information von Fahrzeugen noch bedeutsamer und die Unterschiede zwischen den Fahrzeugtypen möglicherweise noch größer sein.

Fazit

Fußgänger:innen nutzen sowohl visuelle als auch akustische Informationen, um die Bewegung von Fahrzeugen einzuschätzen. Beschleunigende Elektrofahrzeuge geben Fußgänger:innen jedoch offenbar unzureichende akustische Informationen, so dass riskante Situationen im Straßenverkehr entstehen können. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass ein den Vorgaben von UNECE R138 entsprechendes AVAS die Wahrnehmung von beschleunigenden Elektrofahrzeugen in einer Straßenüberquerungssituation zwar verbessert, jedoch nicht die Genauigkeit der Wahrnehmung eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor erreicht. Es gibt bei der Gestaltung der AVAS offenbar noch Verbesserungspotenzial in Bezug auf die akustische Signatur bei Beschleunigung.

Darüber hinaus sollte der Aspekt der Straßenüberquerung zusätzlich zum Aspekt der grundlegenden akustischen Detektion von Fahrzeugen bei der Entwicklung von AVAS-Technologien berücksichtigt werden. Rechtlich müssen AVAS nur bis zu 20 Stundenkilometer aktiv sein. Wie aber die vorliegende Studie erstmalig zeigt, gibt es auch bei höheren Geschwindigkeiten Defizite in der Einschätzung der Elektrofahrzeuge im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. Zu diskutieren wäre demnach eine Ausweitung des Geschwindigkeitsbereiches der AVAS.

Literatur

[1] Statistisches Bundesamt (2021). Fachserie 8 Reihe 7. Verkehr: Verkehrsunfälle 2020.

[2] 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

[3] 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.

[4] Oberfeld-Twistel, D., Wessels, M. & Kröling, S. (2022). Risiko hohe Beschleunigung? Straßenüberquerungsverhalten von Fußgänger:innen in Interaktion mit E-Fahrzeugen (mit und ohne AVAS) im Vergleich zu Verbrennern. Forschungsbericht Nr. 76. Unfallforschung der Versicherer. Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V., Berlin.

[5] Trewhella, J., Edwards, M., & Ibbotson, M. R. (2003). Sensitivity to the acceleration of looming stimuli. Clinical and Experimental Ophthalmology, 31(3), 258-261. doi: 10.1046/j.1442-9071.2003.00641.x

GDV
DIE DEUTSCHEN VERSICHERER

Wilhelmstraße 43 / 43G
10117 Berlin
Tel.: 030 / 20 20 – 58 21
Fax: 030 / 20 20 – 66 33

unfallforschung@gdv.de
www.udv.de
www.gdv.de

facebook.com/unfallforschung
Twitter: @unfallforschung
www.youtube.com/unfallforschung