

Die Pulksimulation als neue Methode zur Erfassung der Wirkung von Car2X-basierten Fahrerassistenzsystemen

Dominik Mühlbacher, Christian Maag und
Hans-Peter Krüger*

Zusammenfassung: Aktuell ist eine hohe Forschungsaktivität im Bereich Car2X-basierter Fahrerassistenzsysteme zu beobachten. Für die Prüfung der verkehrlichen Wirksamkeit dieser Systeme stellt die Pulksimulation, in der mehrere Fahrer gleichzeitig in derselben simulierten Umgebung fahren, eine neue Untersuchungsmethodik dar.

Aufgrund der Charakteristik der Pulksimulation mit mehreren Fahrern ergeben sich neue Anforderungen an die Versuchsplanung, -durchführung und -auswertung. Vor allem im Bereich der Versuchsüberwachung sind neue Methoden und Tools zu entwickeln.

Am Beispiel der Untersuchung eines Gefahrenwarners, der vor bzw. zum Zeitpunkt überraschender Bremsungen vorausfahrender Fahrzeuge warnt, soll das Potential der Pulksimulation dargestellt werden. Hierzu folgten N=16 Probanden jeweils in Kolonnen mit n=4 Fahrern auf einer Landstraße einem Führungsfahrzeug. Es zeigt sich eine Abhängigkeit des Systemnutzens von der Fahrerposition im Pulk. Dieses Ergebnis spricht für den Nutzen der Pulksimulation bei der Untersuchung Car2X-basierter Fahrerassistenz.

Schlüsselwörter: Car2X-Kommunikation, Fahrerassistenz, Fahrsimulation, Methodik.

1 Einleitung

Die Car2X-Technologie eröffnete in den letzten Jahren ein neues Feld für die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen: Durch diesen drahtlosen Kommunikationsweg können Informationen zwischen Fahrzeugen oder zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur (z.B. Lichtsignalanlagen oder Wechselverkehrszeichen) übertragen werden [1], welche mittels der neuen Fahrerassistenzsysteme die Verkehrssicherheit und Verkehrseffizienz erhöhen sollen.

Die empirische Erfassung der verkehrlichen Wirkung Car2X-basierter Fahrerassistenzsysteme erfolgt in der Regel mittels der Verkehrssimulation, durch welche Kriterien wie Verkehrssicherheit (z.B. Verteilung von Zeitlücken) oder Verkehrseffizienz (z.B. Harmonisierung des Verkehrsablaufs) erfasst werden können. Daneben besteht die Möglichkeit, durch aufwändige Feldversuche im Realverkehr (z.B. sim^{TD}; für nähere Informationen siehe www.simtd.de; [2]) Wirkaussagen zur Car2X-Technologie treffen zu können. Da für die

* Interdisziplinäres Zentrum für Verkehrswissenschaften (IZVW) an der Universität Würzburg (e-mail: muehlbacher@psychologie.uni-wuerzburg.de, maag@psychologie.uni-wuerzburg.de, krueger@psychologie.uni-wuerzburg.de).

Untersuchung dieser Technologie allerdings mehrere Fahrzeuge benötigt werden, sind spezielle Anforderungen an die Versuchsmethodik (wie z.B. koordiniertes Fahren; siehe [3]) notwendig.

Als alternative und innovative Methode für die Überprüfung derartiger Fragestellungen wurde am Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften (WIVW) als Erweiterung der Einzelfahrsimulation die sog. Pulksimulation entwickelt, in welcher sich Fahrer gemeinsam in einer virtuellen Umgebung bewegen können. Die Pulksimulation bietet mehrere Vorteile, um die verkehrliche Wirkung von Car2X-basierten Systemen zu untersuchen:

- Die Kommunikationswege der untersuchten Fahrerassistenzsysteme müssen nicht technisch nachgebildet, sondern lediglich simuliert werden.
- Aufgrund der Simulationsumgebung sind sicherheitskritische Untersuchungen möglich, ohne die Fahrer zu gefährden.
- Probanden liefern reale Verhaltensparameter, die nicht auf Annahmen von Fahrermodellen wie in der Verkehrssimulation beruhen.
- Neben Fahrverhaltensdaten können auch subjektive Urteile der Probanden erfasst werden, welche eine Prüfung der Nutzerakzeptanz von Car2X-basierten Systemen ermöglichen.

Im vorliegenden Beitrag soll zunächst die Methode der Pulksimulation vorgestellt werden. Anschließend wird der Einsatz der Pulksimulation zur verkehrlichen Wirkungsermittlung von Car2X-basierten Systemen beispielhaft an der Untersuchung eines Gefahrenwarners dargestellt.

2 Methode der Pulksimulation

2.1 Aufbau

Die Pulksimulation des WIVW besteht aus fünf Fahrstationen. An jeder Fahrstation kann jeweils ein Proband sitzen und sein simuliertes Fahrzeug steuern (siehe Abbildung 1 links). Da die Fahrzeuge in einer gemeinsamen virtuellen Umwelt unterwegs sind, sehen sich die Fahrer gegenseitig (siehe Abbildung 1 rechts) und können auf das Verhalten der anderen Versuchsteilnehmer reagieren.

Jede der Fahrstationen verfügt über ein 150° horizontales Sichtfeld, bestehend aus drei LCD-Displays mit jeweils 22“ Bildschirmgröße und einer Auflösung von 1680x1050 Punkten. Die Innen- und Außenspiegel werden ebenso wie das Kombiinstrument mit Tachometer, Drehzahlmesser und Fahrtrichtungsanzeiger in die Frontsicht eingeblendet.

Als Mockup wird jeweils ein um Force Feedback erweitertes PC-Spielelenkrad mit Pedalerie verwendet. Um den Blinker zu setzen, müssen die Fahrer Knöpfe auf der linken bzw. rechten Seite des Lenkrads betätigen. Für Nebenaufgaben und HMI-Untersuchungen steht ein LCD-Display mit 800x480 Punkten zur Verfügung. Es handelt sich um einen Touchscreen, so dass auch Bedieneingaben darüber möglich sind.



Abbildung 1: Fahrstationen der Pulksimulation (links). Screenshot aus Sicht des dritten Fahrers eines Pulks mit vier Fahrzeugen – zu sehen sind die Fahrzeuge der anderen drei Probanden des Pulks in der Frontsicht sowie im Innenspiegel (rechts).

Die Soundsimulation läuft ebenso wie die Kommunikation zwischen Probanden und Versuchsleitung über Headsets. Für die Kommunikation existieren verschiedene Optionen, welche vom Operator gesetzt werden:

- Zu wem kann der Operator sprechen?
Der Operator kann entweder zu allen Fahrern gemeinsam (z.B. bei Instruktion zu Beginn der Fahrt) oder gezielt zu einem Fahrer (z.B. bei Erinnerung an die Instruktion bei von der Instruktion abweichendem Verhalten) sprechen.
- Zu wem kann der Proband sprechen?
Als Standardeinstellung ist vorgesehen, dass der Fahrer ausschließlich mit dem Operator kommunizieren kann (z.B. um Fragen zu stellen). Falls in einer Studie verbale Interaktionen zwischen Fahrern erforderlich sind, können die Fahrer sowohl untereinander als auch zu den Operatoren sprechen (z.B. bei kognitiven Nebenaufgaben während der Fahrt, siehe [4]).

Das Rechnernetz der Pulksimulation besteht aus insgesamt 25 PCs, die über Gigabit-Ethernet verbunden sind.

2.2 Anforderungen an die Versuchsplanung

Die Pulksimulation ist insbesondere für Szenarien zu empfehlen, in welchen die Fahrer aufeinander reagieren müssen bzw. in Abhängigkeit voneinander fahren. Die Realisierung dieser Voraussetzung wird durch die vorbestimmte Fahraufgabe erreicht.

Bei einer Untersuchung von Folgefahren beispielsweise kann dies durch eine geeignete Instruktion umgesetzt werden. Da eine Abhängigkeit von weit aufeinander folgenden Fahrzeugen nicht zu erwarten ist (nach [5]: bei Sekundenabständen größer als sechs Sekunden), sind Instruktionen für dichteres Folgefahren zu empfehlen (z.B. durch die Instruktionen „halber Tacho einhalten“, „Zwei-Sekunden-Regel einhalten“ oder „geringstmöglichen Abstand einhalten“; siehe z.B. [6]).

Beispiele für weitere Szenarien und Fragestellungen, bei denen Abhängigkeiten zwischen den Fahrern zu erwarten sind, sind:

- Kreuzungs- und Querverkehrsszenarien
- Gegenverkehrsszenarien
- Untersuchungen kooperativer Assistenz
- Beeinflussung durch andere Fahrzeuge (welche z.B. mit einem Assistenzsystem ausgestattet sind)
- Untersuchungen von Emotionen im Straßenverkehr (z.B. Aggression)

Eine weitere Möglichkeit bei der Pulksimulation stellt der Einsatz eines Komparsen dar, der gegenüber den anderen Versuchsfahrern als Proband auftritt, aber ein Vertrauter der Versuchsleitung ist. Durch das Ausführen von Anweisungen der Versuchsleitung kann der Komparsen die Realisierung gewünschter Szenarien ermöglichen.

2.3 Anforderungen an die Versuchsdurchführung

Der Einsatz mehrerer Fahrer während eines Versuchs bringt bestimmte Anforderungen an die Versuchsdurchführung mit sich. So können durch den Einsatz mehrerer Fahrer unvorhergesehene Störungen (z.B. Ausfall eines Fahrers, Abbruch einer Fahrt, falsche Ausführung der Instruktion) mit einer höheren Wahrscheinlichkeit auftreten. Dies erfordert eine hohe Flexibilität und Handlungsorientierung auf Seiten der Versuchsleitung.

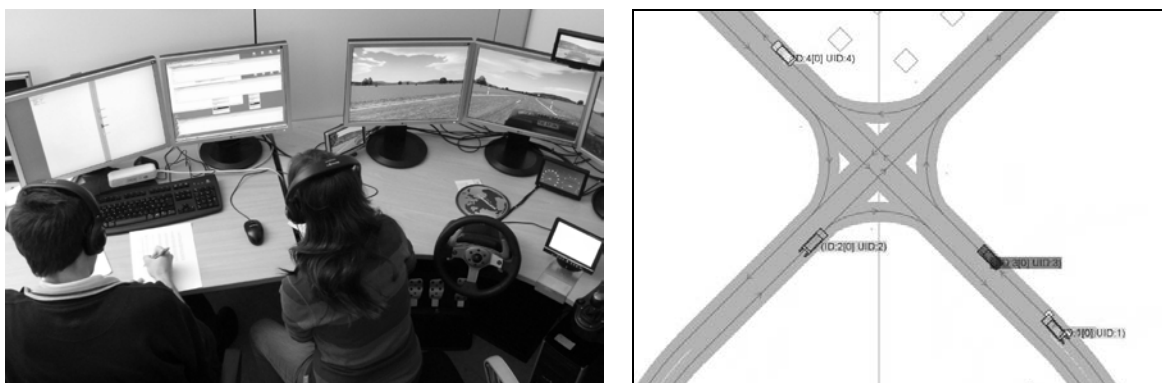


Abbildung 2: Operatornplatz der Pulksimulation mit Vogelperspektive, SILAB-Benutzeroberfläche und Mitschau der Frontsicht eines Fahrers (links). Screenshot der Vogelperspektive einer Kreuzungssituation mit vier Fahrzeugen (rechts).

Für die sofortige Detektion dieser Störungen ist eine sorgfältige Überwachung der Fahrer und Fahrsituationen notwendig. Hierfür stehen der Versuchsleitung am Operatornplatz der Pulksimulation (siehe Abbildung 2 links) drei Hilfsmittel zur Verfügung:

- Durch die Vogelperspektive erhält der Operator einen Überblick der gesamten Versuchssituation (siehe Abbildung 2 rechts).
- Durch die grafische Benutzeroberfläche der Simulationssoftware SILAB kann der Operator relevante Fahrdaten der einzelnen Fahrer (z.B. Abstände und Geschwindigkeiten) entweder als Zahlenwert oder grafische Verlaufskurve live überwachen. Falls die aufgezeichneten Daten eines Fahrers bestimmte Schwellen (z.B. Überschreitung der zulässigen Geschwindigkeit um einen definierten Wert) überschrei-

ten, kann dies durch eine farbige Veränderung der Anzeige hervorgehoben werden.

- Durch die Mitschau der Frontsichten der einzelnen Fahrer kann der Operator das Geschehen aus Fahrersicht betrachten.

Aufgrund des erhöhten Bedarfs an Fahrerorganisation und -überwachung empfiehlt sich der Einsatz mehrerer Operatoren. Hier ist eine klare, an die Zielsetzung des Versuchs angepasste Aufgabenverteilung zu empfehlen. Im in Kapitel 3 vorgestellten Versuch war die Aufgabenverteilung beispielsweise folgendermaßen gestaltet:

- Der Haupt-Operator hielt den Kontakt mit den Fahrern (z.B. Begrüßung, Instruktionen, Kommunikation mit Fahrern während der Fahrt) und überwachte die globale Fahrsituation aller Fahrer (Konzentration auf Vogelperspektive).
- Der Co-Operator unterstützte den Haupt-Operator organisatorisch (z.B. Verteilen und Abheften von Fragebögen) und überwachte die Fahrdaten der einzelnen Fahrer (Konzentration auf die in der SILAB-Benutzeroberfläche dargestellten Fahrdaten).

2.4 Möglichkeiten der Auswertung

Der gleichzeitige Einsatz mehrerer Fahrer in einer Untersuchung erweitert die Auswertungsmöglichkeiten, da neben Parametern zur Beschreibung des Fahrverhaltens des einzelnen Fahrers über den Zeitverlauf zusätzlich auch Parameter zur Beschreibung des gesamten Fahrerpulkts möglich sind. Somit können hier verschiedene Methoden zur Erfassung des Verkehrsablaufs durchgeführt werden (nach [7]):

- Lokale Messung: Parameter über alle Fahrzeuge zu einem Streckenmeter (z.B. mittlere Geschwindigkeit im Straßenquerschnitt)
- Momentane Messung: Parameter über alle Fahrzeuge zu einem Messzeitpunkt (z.B. mittlere Geschwindigkeit zu einem Messzeitpunkt)
- Räumlich-zeitliche Messung: Parameter über alle Fahrzeuge über einen Zeitverlauf und einen Streckenabschnitt (z.B. Verkehrsdichte)

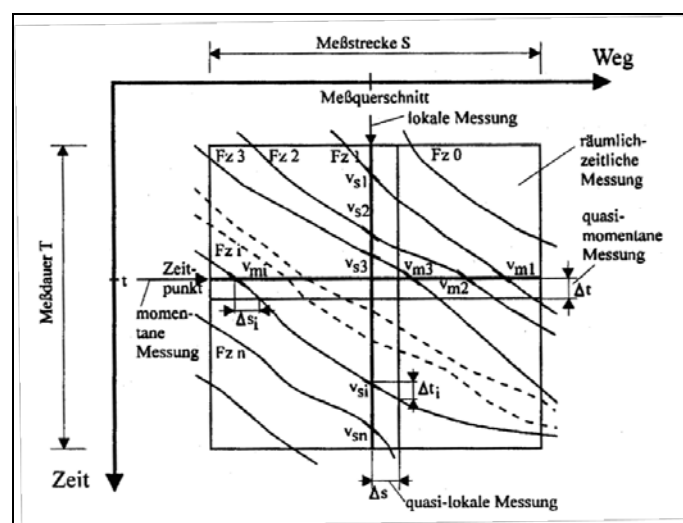


Abbildung 3: Erfassungsmethoden für Kenngrößen des Verkehrsablaufs (aus [7], S.67). Die diagonalen Linien stellen die Verlaufskurven mehrerer Fahrzeuge über Strecke und Zeit dar.

Für diese Messmethoden sind jeweils verschiedene Parameter zur Beschreibung des Pulks möglich, wie z.B. Maße der Dispersion, Maße des Zusammenhangs oder Maße der Ausdehnung des Pulks [4].

3 Studie zur Wirkungsermittlung eines Gefahrenwarners

3.1 Fragestellung

Ziel der Studie war der Vergleich verschiedener Auslegungen einer Gefahrenwarnung, die vier hintereinander in der Pulksimulation fahrende Fahrer gleichzeitig erhielten. Insbesondere ein möglicher Einfluss der Position im Fahrerpulk sollte untersucht werden.

3.2 Methodik

3.2.1 Fahraufgabe

In der Studie mit insgesamt $N=16$ Probanden befuhren vier Fahrergruppen mit jeweils $n=4$ Fahrern mehrere Landstraßenstrecken in der Pulksimulation. Die vier Fahrer hatten jeweils die Aufgabe, die Strecken im Pulk zu befahren, d.h. hintereinander zu fahren und sich nicht gegenseitig zu überholen. Zusätzlich erhielten die Fahrer die Instruktion „halben Tacho einhalten“, um Abhängigkeiten zwischen den Fahrern zu erzeugen (siehe Kapitel 2.2). Insgesamt absolvierte jeder Pulk vier Fahrten, bei denen sich die Probanden in den Reihenfolgen abwechselten, d.h. jeder Fahrer fuhr einmal an jeder der vier Positionen.

Die vier zu befahrenden Landstraßenstrecken hatten jeweils eine Länge von 25.5 km und waren von ähnlichem Streckenprofil. Neben den Überlandstrecken passierten die Fahrer auch zwei Ortsdurchfahrten.

Auf einem separaten Teilstück jeder Strecke, bestehend aus drei Abschnitten mit jeweils 2.6 km Länge (insg. 7.8 km), wurde das Fahrerassistenzsystem untersucht. Zu Beginn eines jeden Abschnitts scherte ein simuliertes Fahrzeug mittels einer Kreuzung vor das erste Fahrzeug des Pulks ein. Der Pulk folgte nun diesem Führungsfahrzeug, das mit einer konstanten Geschwindigkeit von 83 km/h fuhr.

- In Prüfsituationen bremste es zu einem vordefinierten Zeitpunkt stark auf 61 km/h ab. Anschließend beschleunigte es wieder auf die Ausgangsgeschwindigkeit von 83 km/h.
- In Kontrollsituationen bremste es während des Streckenabschnitts nicht ab.

An der nächsten Kreuzung fuhr das Führungsfahrzeug von der Landstraße ab, worauf gegebenenfalls ein anderes simuliertes Fahrzeug auf die Strecke vor dem Pulk einscherte.

3.2.2 Gefahrenwarner

Der Gefahrenwarner hatte die Aufgabe, die Fahrer bei bzw. vor starken Längsverzögerungen des simulierten Führungsfahrzeugs und damit auch erwarteten Bremsungen der ersten Fahrzeuge im Pulk zu warnen. Die Warnung wurde für die Fahrer direkt in der Fahrscene dargestellt, indem über dem simulierten Führungsfahrzeug ein blinkendes Verkehrszeichen mit einem Ausrufezeichen eingeblendet wurde (siehe Abbildung 4 links). Insgesamt wurden zwei Auslegungen der Warnung sowie eine Kontrollsituation (siehe Abbildung 4

rechts) umgesetzt:

- „Frühe Warnung“: Das System warnt, wenn eine starke Längsverzögerung eines Vorderfahrzeugs zu erwarten ist. In der Simulation begann die Warnung 300 m vor der Bremsung des simulierten Führungsfahrzeugs. Nach der Bremsung blieb die Warnung noch für etwa 10 s eingeblendet.
- „Späte Warnung“: Das System warnt im Moment starker Längsverzögerungen eines Vorderfahrzeugs. Nach der Bremsung blieb die Warnung noch für etwa 10 s eingeblendet.
- „Ohne Warnung“: Das Führungsfahrzeug bremst ohne eine Warnung.

Die Warnungen erschienen in permutierter Reihenfolge. Insgesamt erlebte jeder Fahrer jede Warnauslegung sowie die Kontrollsituation jeweils zweimal, allerdings an unterschiedlichen Positionen im Pulk.

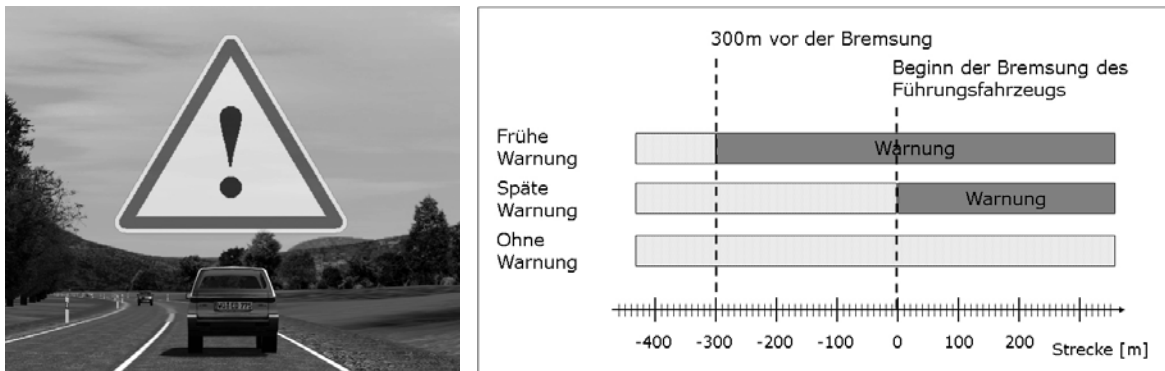


Abbildung 4: Blinkendes Verkehrszeichen über dem simulierten Führungsfahrzeug (links). Grafische Darstellung der Prüfsituationen: Während der dunkelgrau hinterlegten Phasen erschien jeweils die Warnung (rechts).

Der Gefahrenwarner gehört zur Gruppe der Car2X-basierten Fahrerassistenzsysteme, da im realen Straßenverkehr die starke Verzögerung des eigenen Fahrzeugs detektiert und mittels Übertragungsmedien wie z.B. W-LAN direkt an die umgebenden Fahrzeuge gesendet werden würde. In diesen Fahrzeugen kann der Fahrer daraufhin durch eine Meldung vor den zu erwarteten Verzögerungen gewarnt werden.

3.2.3 Stichprobe

An der Untersuchung nahmen N=16 Probanden (6 Frauen, 10 Männer) im Alter von 23 bis 40 Jahren teil. Die Probanden stammen aus dem Testfahrerpanel des WIVW. Zuvor absolvierten alle Fahrer ein Training in der Pulksimulation mit verschiedenen Fahraufgaben (angelehnt an [8]), um die Probanden mit der Bedienung der Fahrstation vertraut zu machen und die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Simulator-Übelkeit zu verringern. Für die Teilnahme am Versuch erhielten die Probanden eine Aufwandsentschädigung.

3.2.4 Erfasste Daten

Für jedes Pulkfahrzeug wurden alle Parameter der Bedienung des Fahrzeugs (z.B. Gas-

und Bremspedalnutzung, Lenkradwinkel), Parameter des Fahrzeugmodells (z.B. Geschwindigkeit, Längsbeschleunigung) sowie Fahrparameter des Führungsfahrzeugs (z.B. Abstand, Geschwindigkeit) mit einer Update-Rate von 60 Hz aufgezeichnet. Darüber hinaus wurden jeweils direkt nach den Prüfsituationen Fahrerurteile zu wahrgenommener Schwierigkeit, Überraschung und Ärger mittels Befragung auf dem LCD-Display erfasst.

3.3 Ergebnisse

Die Auswertung zeigt, dass nur die Fahrer auf der ersten Position auf die frühe Warnung reagieren. So vergrößern sie im Intervall zwischen früher Warnung und Bremsung des Führungsfahrzeugs den Abstand zu diesem in höherem Maße als in den anderen Prüfsituationen ($F(2; 21)=8.041$; $p=.003$; siehe Abbildung 5 links). Bei den Fahrern auf den hinteren Positionen zeigen sich dagegen keine Unterschiede zwischen den Prüfsituationen in diesem Intervall.

Diese Abstandsvergrößerung hat zur Folge, dass der erste Fahrer nach der Bremsung des simulierten Führungsfahrzeugs seine Fahrgeschwindigkeit weniger stark reduzieren ($F(2; 21)=4.135$; $p=.026$) und weniger stark bremsen muss ($F(2; 21)=4.039$; $p=.028$; siehe Abbildung 5 rechts), verglichen mit der späten Warnung bzw. der Situation ohne Warnung. Die hinteren Fahrer profitieren ebenfalls von der frühen Warnung, da auch sie weniger stark bremsen müssen ($F(2; 69)=2.560$; $p=.101$; siehe Abbildung 5 rechts). Der Nutzen der Warnung steigt mit einer weiter hinten liegenden Position im Pulk an.

Bei der späten Warnung zeigen die ersten beiden Fahrer ebenso starke Bremsreaktionen wie ohne Warnung. Die hinteren Fahrer dagegen profitieren von der späten Warnung in ähnlicher Weise wie von der frühen Warnung. Auch bei der späten Warnung zeigt sich ein zunehmender Anstieg des Nutzens in den hinteren Positionen.

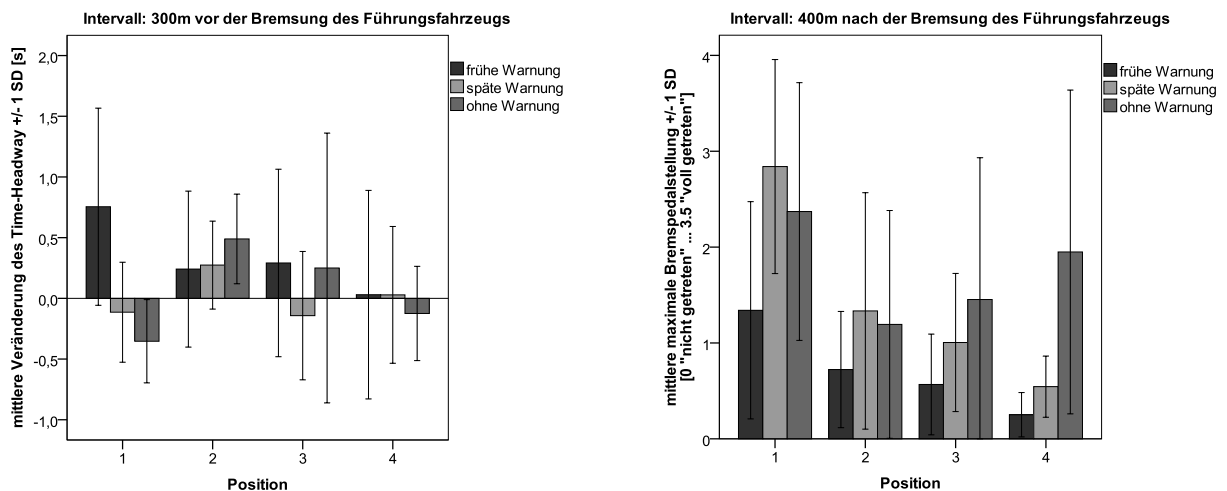


Abbildung 5: Mittlere Veränderung des Time-Headway im Intervall 300m vor der Bremsung für die Prüfsituationen und Positionen – positive Werte bedeuten, dass der Abstand vergrößert wird (links). Mittlere maximale Bremspedalstellung (Maximalwert 3.5) nach der Bremsung des Führungsfahrzeugs für die Prüfsituationen und Positionen (rechts).

Bezüglich der subjektiven Urteile ist ein Effekt auf der ersten Fahrerposition zu beobachten: Während sich die Fahrerangaben auf den hinteren Positionen für die einzelnen Prüfsituationen nicht unterscheiden, beurteilt der erste Fahrer die Situation mit der späten Warnung als ärgerlicher, verglichen mit der frühen Warnung bzw. ohne Warnung ($F(2; 21)=4.137$; $p=.031$; siehe Abbildung 6). Es ist anzunehmen, dass der erste Fahrer eine Warnung im Moment der Bremsung nicht für notwendig hält, da sie zeitgleich mit den Bremslichtern des Führungsfahrzeugs erscheint.

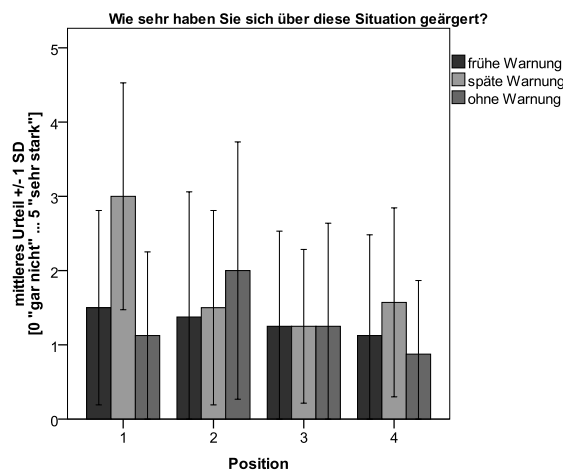


Abbildung 6: Mittleres Fahrerurteil zu Ärger über die Fahrsituation für die Prüfsituationen und Positionen.

4 Diskussion

In dem vorliegenden Artikel wurde die Pulksimulation als Methode zur Erfassung der verkehrlichen Wirkung von Car2X-Funktionen vorgestellt. Der Nutzen wurde am Beispiel der Untersuchung eines Gefahrenwarners gezeigt.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Gefahrenwarner als kooperatives Fahrerassistenzsystem die Fahrsicherheit erhöht. Eine frühe Warnung ist vor allem für die ersten Fahrer direkt hinter dem abbremsenden Führungsfahrzeug hilfreich, für weiter entfernt folgende Fahrer bringt diese vorzeitige Warnung dagegen geringere Vorteile gegenüber der späten Warnung. Auch die subjektiven Angaben deuten darauf hin, dass die frühe Warnung gegenüber der späten Warnung zu präferieren ist.

Der Nutzen der Pulksimulation zur Prüfung von Car2X-basierten Fahrerassistenzsystemen zeigt sich in der vorliegenden Studie, da durch diese Prüfanordnung die verschiedenen Anforderungen aufgrund der unterschiedlichen Position im Pulk identifiziert werden können. Im Vergleich zu den anderen Untersuchungsmethoden Verkehrssimulation, Einzelfahrsimulation und Realverkehr stellt die Pulksimulation die einzige Möglichkeit dar, Auswirkungen eines Fahrerassistenzsystems auf mehrere direkt oder indirekt betroffene Fahrer zu untersuchen, ohne das System technisch als Prototyp implementieren zu müssen. Allerdings muss bei der Interpretation von Ergebnissen in der Pulksimulation und dem Vergleich mit anderen Untersuchungsmethoden die Kontrollierbarkeit der Prüfsituationen

berücksichtigt werden, welche durch den Einsatz mehrerer realer Fahrer eingeschränkt ist. Da die Fahrer ein nicht-standardisiertes Fahrverhalten zeigen (im Gegensatz z.B. zum Umgebungsverkehr in der Einzelfahrsimulation), tragen sie zu einer erhöhten Variabilität der Prüfsituationen und somit zu einer verringerten Möglichkeit der kausaltheoretischen Vorhersage (sog. interne Validität) bei. Allerdings konnten in der vorliegenden Studie trotz eingeschränkt kontrollierter Bedingungen Effekte gezeigt werden, was die Gültigkeit dieser Befunde unterstreicht. Zudem führt die erhöhte Variabilität der Situationen in der Pulksimulation zu einer Erhöhung der Generalisierbarkeit (sog. externe Validität): Da sich der Umgebungsverkehr durch den Einsatz mehrerer realer Fahrer nicht-standardisiert verhält, ähneln die Umgebungsbedingungen in der Pulksimulation denen im realen Verkehr. Aufgrund dieser Bedingungen ist die Pulksimulation bezüglich interner und externer Validität zwischen Einzelfahrsimulation (hohe interne Validität, eingeschränkte externe Validität) und Realverkehr (hohe externe Validität, geringe interne Validität) einzuordnen. Vergleichende Studien zwischen den Versuchsumgebungen sind notwendig, um diese Annahme zu bestätigen. In weiteren Studien in der Pulksimulation sind diese Aspekte bei der Operationalisierung zu berücksichtigen.

Anmerkung: Diese Arbeit wurde teilweise im Rahmen des Projekts “Complex socio-technical system in ambient intelligence” (SOCIONICAL) durchgeführt und durch das 7. Forschungsrahmenprogramm der EU finanziell unterstützt.

Literatur

- [1] T. Kleine-Besten, U. Kersken, W. Pöchmüller, und H. Schepers, „Navigation und Telematik“, in H. Winner, S. Hakuli und G. Wolf (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Wiesbaden, Vieweg + Teubner, 2009.
- [2] I. Totzke, D. Mühlbacher, S. Buld, und H.-P. Krüger, „simTD (Sichere Intelligente Mobilität – Testfeld Deutschland): Empirische Wirkungsermittlung von Car-2-X-Technologien im Feldversuch und in der Fahrsimulation“, Beitrag beim 19. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentchnik, Oktober 2010.
- [3] I. Totzke, F. Naujoks, D. Mühlbacher und H.-P. Krüger, „Koordiniertes Fahren mehrerer Fahrzeuge als Prüfansatz von Car-2-X-Technologien im Feld“, Beitrag bei der 26. VDI/VW Gemeinschaftstagung „Fahrerassistenz und aktive Sicherheit“, Oktober 2010.
- [4] D. Mühlbacher, J. Zimmer, F. Fischer und H.-P. Krüger, “The multi-driver simulator – A new concept of driving simulation for the analysis of interactions between several drivers”, in D. de Waard, N. Gérard, L. Onnasch, R. Wiczorek, und D. Manzey (Hrsg.): Human Centred Automation, Maastricht, Niederlande, Shaker Publishing, 2011.
- [5] K. Vogel, „What characterizes a „free vehicle“ in an urban area?“, Transportation Research Part F, Vol. 5, pp. 15-29, 2002.

- [6] M. Taieb-Maimon und D. Shinar, "Minimum and Comfortable Driving Headways: Reality versus Perception", *Human Factors*, Vol. 43, S. 159-172, 2001.
- [7] W. Schnabel und D. Lohse, „Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung, Band 1“,. Berlin, Verlag für Bauwesen, 1997.
- [8] S. Hoffmann und S. Buld, „Darstellung und Evaluation eines Trainings zum Fahren in der Fahrsimulation“,. in VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik (Hrsg.), *Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme (VDI-Berichte, Nr. 1960, S. 113-132)*, Düsseldorf, VDI-Verlag, 2006.