

Erweiterung aktiver Fußgängerschutzsysteme durch eine fahrerinitiierte Ausweichunterstützung

Thomas Gußner, Lutz Bürkle und Claus Marberger*

Zusammenfassung: Dieser Beitrag beschreibt ein Fahrerassistenzsystem zur Vermeidung von Fußgängerunfällen. Zusätzlich zu den bereits in Serie verfügbaren Reaktionsmustern – also insbesondere einer automatischen Vollbremsung – unterstützt es den Fahrer während eines Ausweichmanövers um den Fußgänger herum. Mittels einer Front-Stereo-Kamera werden Fußgänger erkannt und deren Position und Geschwindigkeit gemessen. Darüber hinaus können der zum Ausweichen verfügbare Freiraum sowie andere Verkehrsteilnehmer, wie z.B. Gegenverkehr, welche die Ausweichmöglichkeiten weiter einschränken, erkannt werden. Über zusätzliche Seitensensoren wird außerdem parallel fahrender Verkehr erfasst. Basierend auf dem erkannten Freiraum sowie einer Prädiktion des Fußgängers und der weiteren relevanten Verkehrsteilnehmer wird durch Lösen eines Optimierungsproblems eine Ausweichtrajektorie geplant. Reagiert der Fahrer am Lenkrad durch eine Ausweichbewegung, so wird die Ausweichunterstützung aktiviert und der Fahrer durch Überlagerung von Lenkmomenten während des Ausweichmanövers auf einer optimalen Ausweichtrajektorie stabilisiert. Das beschriebene System wurde in einem Versuchsfahrzeug implementiert und dessen Wirksamkeit in einer Probandenstudie evaluiert.

Schlüsselwörter: Aktiver Fußgängerschutz, Ausweichunterstützung, Trajektorienplanung, Fahrerverhalten

1 Einleitung

Weltweit haben Fußgängerunfälle nach wie vor einen großen Anteil an den Unfällen mit Getöteten und Schwerverletzten im Straßenverkehr [1]. Ein wichtiger Schritt zur Reduzierung der Anzahl der verletzten und getöteten Fußgänger wird die Einführung von automatischen Notbremssystemen für Fußgänger im Rahmen des europäischen Bewertungsprogramms für Neuwagen (EuroNCAP) sein. Allerdings können die hier bewerteten Reaktionsmuster selbst bei hypothetisch idealer Umfeldsensorik und Situationsanalyse nur einen Teil der Fußgängerunfälle vermeiden. Insbesondere in Szenarien, in denen das Fahrzeug relativ schnell fährt und in denen der Fußgänger z.B. aufgrund einer Verdeckung erst spät sichtbar wird, kann eine Kollision durch Bremsen alleine häufig nicht mehr vermieden, sondern nur noch durch Reduktion der Kollisionsgeschwindigkeit abgeschwächt werden. Dagegen kann ein geeignetes Ausweichmanöver in diesen Fällen den Unfall häufig noch vollständig vermeiden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der benötigte Weg für

*Robert Bosch GmbH, Zentralbereich Forschung und Voraentwicklung, Abt. CR/AEV (e-mail: thomas.gussner@de.bosch.com). Dieser Beitrag entstand im Rahmen der Forschungsinitiative UR:BAN (Urbaner Raum: Benutzergerechte Assistenzsysteme und Netzmanagement). UR:BAN wird gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

ein Ausweichmanöver definierter Breite mit der Geschwindigkeit linear zunimmt, während der Bremsweg mit der Geschwindigkeit quadratisch wächst.

Eine nahe liegende Möglichkeit diesen Zusammenhang auszunutzen besteht darin, für den Fall einer drohenden Kollision mit einem Fußgänger, die durch Bremsen alleine nicht mehr zu vermeiden ist, ein automatisches Ausweichmanöver zu implementieren [2, 3]. Allerdings haben Probandenstudien gezeigt [4], dass ein automatischer Lenkeingriff mittels Momentenüberlagerung häufig nicht zum Erfolg führt, da er von den meisten Fahrern unterdrückt bzw. ausgeregelt wird. Selbst bei einer kurz bevorstehenden Kollision mit einem Fußgänger-Dummy wird ein automatischer Lenkeingriff vom Fahrer oft blockiert. Andererseits zeigen Fahrer bei einer kritischen Annäherung häufig selbst eine initiale Lenkreaktion, sind dann allerdings nicht in der Lage, das Ausweichmanöver so auszuführen, dass es nicht trotzdem zu einer Kollision mit dem Fußgänger kommt [5]. Daher stellen wir in diesem Beitrag ein System vor, das im Falle einer bevorstehenden Fußgängerkollision zunächst nur die bereits in Serie verfügbaren Reaktionsmuster – also Warnung, Teilbremsung, automatische Vollbremsung – ausführt. Erst wenn der Fahrer die Gefahrensituation antizipiert und von sich aus durch eine entsprechende Bewegung am Lenkrad zu einem Ausweichmanöver ansetzt, wird er beim Ausweichen durch Aufschalten geeigneter Lenkmomente unterstützt, um den Fußgänger sicher zu umfahren. Das System ähnelt diesbezüglich dem in [6] vorgestellten Fahrerassistenzsystem, das den Fahrer beim Vermeiden von Unfällen im Längsverkehr unterstützt.

Die Wirksamkeit des Systems wurde im Rahmen einer Probandenstudie untersucht. Hierbei wurden untrainierte Fahrer mit einem plötzlich erscheinenden Fußgängerdummy auf Kollisionskurs konfrontiert. Eine Gruppe von Fahrern hatte dabei keinerlei Assistenzsystem im Fahrzeug, während einer zweiten Gruppe die beschriebene Ausweichunterstützung zur Verfügung stand. Die Wirksamkeit des Systems konnte somit durch Vergleichen des Anteils der vermiedenen Kollisionen in beiden Gruppen abgeschätzt werden.

Im Folgenden wird in Abschnitt 2 zunächst ein Überblick über das System und die verwendeten Komponenten gegeben. Anschließend werden die Erkennung der Ausweichabsicht des Fahrers in Abschnitt 3 und die Trajektorienplanung zur Kollisionsvermeidung in Abschnitt 4 beschrieben. In Abschnitt 5 werden die Probandenstudie, die zur Untersuchung der Wirksamkeit des Systems durchgeführt wurde, und deren Ergebnisse vorgestellt.

2 Systemüberblick

Abbildung 1 gibt einen Überblick über das System und die verwendeten Umfeldsensoren. Zur Erfassung des Bereichs vor dem Fahrzeug wird eine Bosch-Stereo-Kamera verwendet, um sowohl Fußgänger, als auch Hindernisse und weitere Verkehrsteilnehmer, wie z.B. Gegenverkehr, die den möglichen Raum für ein Ausweichmanöver einschränken, zu erkennen. Mit Hilfe von Seitensensoren, wie z.B. Ultraschallsensoren oder Seitenkameras, kann parallel fahrender Verkehr neben dem Fahrzeug erfasst werden.

Auf Basis der Umfeldsensordaten analysiert das System nun permanent die Umgebung des Fahrzeugs und repräsentiert dieses in Form sowohl einer Objektliste, die insbesondere die Attribute relevanter Verkehrsteilnehmer beschreibt, als auch eines Belegungsgitters, das unabhängig von spezifischen Objektmodellen die stationären Hindernisse in der Umgebung des Fahrzeugs darstellt. Aus beiden Repräsentationen wird in der Situationsanalyse ein Korridor bestimmt, innerhalb dessen sich ein Ausweichmanöver sicher durchführen

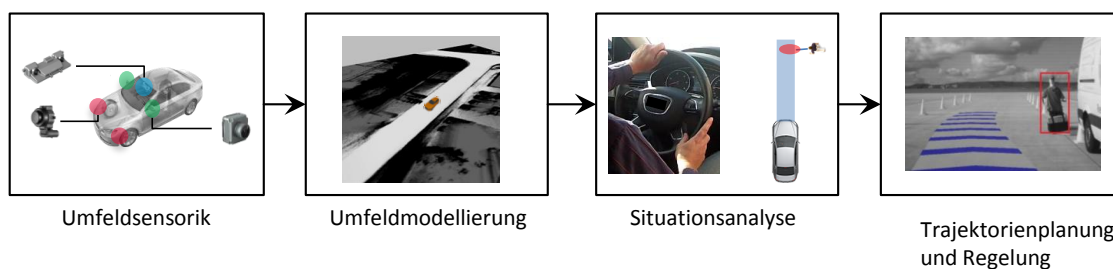


Abbildung 1: Systemarchitektur des Fußgängerschutzsystems mit Ausweichunterstützung.

lässt. Dabei werden sowohl statische Hindernisse als auch dynamische Verkehrsteilnehmer berücksichtigt. Basierend auf den Objektattributen und den Fahrzeugbewegungsdaten wird die Kollisionswahrscheinlichkeit mit evtl. erkannten Fußgängern geschätzt sowie das Lenkverhalten des Fahrers analysiert. Wird erkannt, dass eine erhöhte Kollisionswahrscheinlichkeit mit einem Fußgänger besteht, so werden zyklisch möglich Ausweichtrajektorien berechnet, die innerhalb des Korridors links und rechts an dem Fußgänger vorbei führen. Sobald der Fahrer ein Ausweichmanöver einleitet, wird er durch Aufschalten geeigneter Lenkmomente, die sich aus der geplanten Trajektorie ergeben, beim Ausweichen unterstützt.

3 Ausweichabsichtserkennung

Die Ausweichunterstützung, also das Aufschalten unterstützender Lenkmomente zur Stabilisierung des Fahrzeugs auf einer kollisionsvermeidenden Ausweichtrajektorie, wird erst dann aktiviert, wenn eine Ausweichabsicht des Fahrers erkannt wurde, d.h. wenn der Fahrer selbst das Ausweichmanöver durch eine entsprechende Lenkradbewegung eingeleitet hat. Als weitere Aktivierungsbedingungen müssen außerdem eine Mindestkollisionswahrscheinlichkeit mit einem Fußgänger vorliegen und ausreichend Platz für ein Ausweichmanöver vorhanden sein.

Die Auslegung der Ausweichabsichtserkennung erfolgte auf der Basis von Messdaten der in Abschnitt 5 beschriebenen Probandenstudie. Es zeigt sich, dass die Ausweichabsicht des Fahrers zuverlässig auf Basis des Lenkradwinkels δ_{th} und der Lenkradwinkelgeschwindigkeit $\dot{\delta}_{th}$ erkannt werden kann. Um unerwünschte Auslösungen beim Rangieren oder bei Kurvenfahrten zu vermeiden, werden zusätzliche Bedingungen eingeführt, etwa eine Mindestgeschwindigkeit des Fahrzeugs¹. Außerdem kann die Ausweichunterstützung nur bei Geradeausfahrt aktiviert werden.

Abbildung 2 zeigt exemplarisch den Verlauf von Lenkradwinkel und Lenkradwinkelgeschwindigkeit von zwei Fahrern unmittelbar vor einer Kollision mit einem Fußgängerdummy, der jeweils unerwartet hinter einer Verdeckung erschienen ist (siehe Abschnitt 5). In der Abbildung wird der Fußgänger für den Fahrer zum Zeitpunkt $t = 0$ sichtbar. Der Zeitpunkt, zu dem der Ausweichwunsch des Fahrers erkannt wird, ist jeweils mit einem Kreuz markiert. Bei Fahrer 2 (Abbildung 2 rechts) ist die Reaktion deutlich schwächer

¹Eine Mindestgeschwindigkeit ist auch deshalb wünschenswert, weil bei langsamen Geschwindigkeiten ein Ausweichmanöver keinen Vorteil gegenüber einem reinen Bremsmanöver bietet

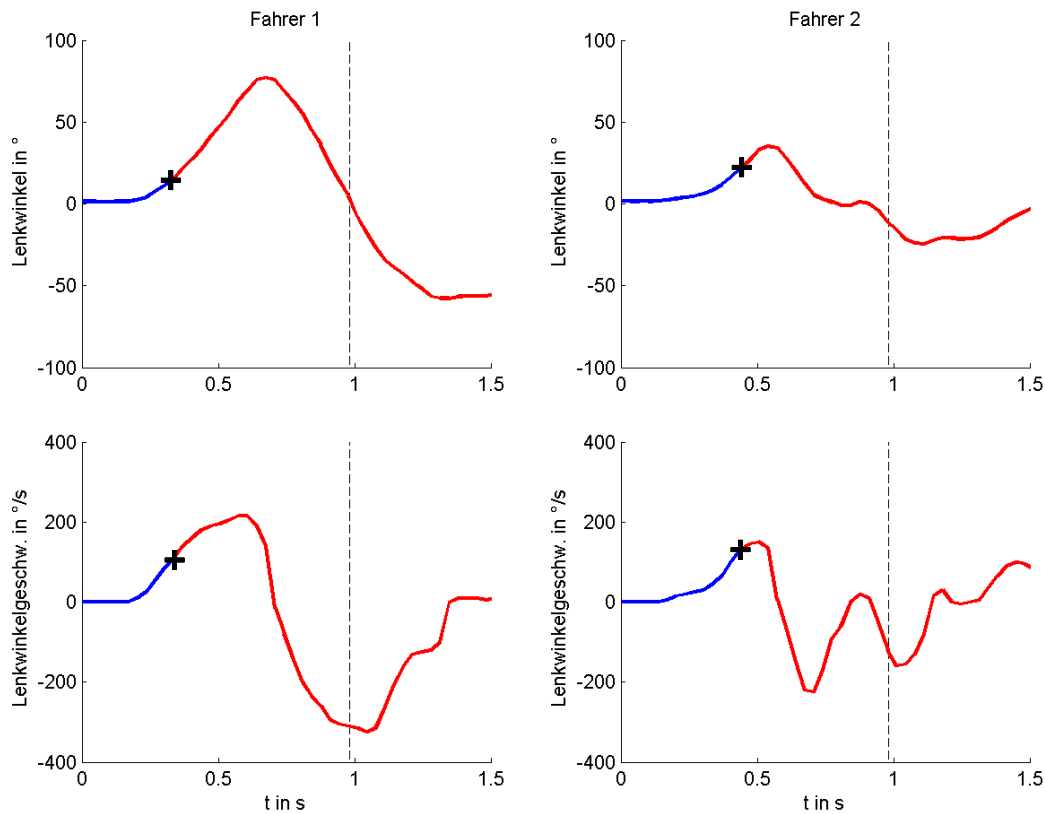


Abbildung 2: Lenkwinkel und Lenkwinkelgeschwindigkeit von zwei Fahrern – Fahrer 1 links, Fahrer 2 rechts – kurz vor einer Kollision mit einem Fußgängerdummy. Bei $t = 0$ wird der Fußgängerdummy sichtbar. Die gestrichelte Linie (–) markiert den Zeitpunkt der Kollision. Der jeweilige Zeitpunkt der Erkennung des Fahrerausweichwunsches ist durch ein + markiert.

ausgeprägt als bei Fahrer 1 (links). Nichtsdestotrotz wird der Ausweichwunsch der Fahrer in beiden Fällen erkannt, im zweiten Fall jedoch etwas später.

Analysiert man das beschriebene Kriterium anhand von Dauerlaufdaten freier Autofahrten im urbanen Raum, auf Landstraßen und Autobahnen, so zeigt sich, dass z.B. durch schreckhafte Spurkorrektur des Fahrers das Kriterium ebenfalls ausgelöst werden kann. Diese Situationen führen jedoch nicht zu einer ungerechtfertigten Auslösung der Funktion, da hierzu zusätzlich, wie oben beschrieben, eine hohe Kollisionswahrscheinlichkeit mit einem Fußgänger und ausreichend Raum für ein Ausweichmanöver vorhanden sein müssen.

4 Trajektorienplanung

Im Rahmen der Trajektorienplanung soll eine Ausweichtrajektorie gefunden werden, die im Wesentlichen die folgenden Eigenschaften aufweist: Zum einen soll das Kollisionsrisiko mit dem Fußgänger minimiert werden. Gleichzeitig sollen andererseits die Querbesehleunigung während des Ausweichmanövers und der maximal aufgebaute Querversatz möglichst klein sein. Außerdem darf das Fahrzeug während des gesamten Ausweichmanövers den Ausweichkorridor nicht verlassen. Der Ausweichkorridor, der für die Planung der Trajektorie zur Verfügung steht, berücksichtigt dabei sowohl statische Hindernisse

wie parkende Fahrzeuge, Randbebauung, usw. als auch andere Verkehrsteilnehmer, also Gegenverkehr, parallel fahrende Fahrzeuge, andere Fußgänger, usw. Für alle potentiell dynamischen Objekte muss dazu eine Prädiktion durchgeführt werden, um sicherzustellen, dass der Fahrkorridor auch künftige Aufenthaltsgebiete der Verkehrsteilnehmer für die Planung der Ausweichtrajektorie ausschließt.

Die Trajektorienplanung, die immer dann durchgeführt wird, wenn eine hohe Kollisionswahrscheinlichkeit mit einem Fußgänger vorliegt, lässt sich basierend auf den obigen Vorgaben als Lösung eines Optimierungsproblems darstellen. Dazu wird die Trajektorie parametrisch durch eine Funktion

$$\begin{aligned} y(x(t)) &= f(x, \mathbf{c}), \\ x(t) &= \int_0^t v_x(\tau) d\tau \end{aligned}$$

beschrieben. Dabei ist \mathbf{c} der Koeffizienten-Vektor, der Verlauf, Länge und Breite des Ausweichmanövers beeinflusst. Als Ursprung des Koordinatensystems x, y wird die Fahrzeugposition zu Beginn des Ausweichmanövers zum Zeitpunkt $t = 0$ gewählt, wobei die x -Achse in Richtung der Fahrzeuglängsachse weist. $v_x(t)$ beschreibt die x -Komponente der Fahrzeuggeschwindigkeit während des Ausweichmanövers. Näherungsweise kann z.B. $v_x(t) = v(0)$ angenommen werden.

Aus der Wahl für \mathbf{c} ergeben sich neben der Position $x(t), y(t)$ u.a. auch der zeitliche Verlauf des Gierwinkels $\varphi(t, \mathbf{c})$, der Gierrate $\dot{\varphi}(t, \mathbf{c})$ und der Querschleunigung $a_y(t, \mathbf{c})$ für den Zeitraum des Manövers $t \in [0, t_E]$. Es kann nun folgendes Optimierungsproblem

$$\min_{\mathbf{c}} a_0 y_{E,\max} + a_1 a_{y,\max} + a_2 p_{\text{coll}},$$

mit den Nebenbedingungen

$$\begin{aligned} (x(t), y(t)) &\in \mathcal{C} \quad \forall t, \\ a_y(t, \mathbf{c}) &\leq a_{y,\text{lim}} \quad \forall t, \\ p_{\text{coll}} &< p_{\text{coll,lim}}, \\ \varphi(t = t_E, \mathbf{c}) &= \varphi(t = 0), \\ \dot{\varphi}(t = t_E, \mathbf{c}) &= 0, \\ \dot{\varphi}(t = 0, \mathbf{c}) &= \omega(t = 0), \\ &\vdots \end{aligned}$$

aufgestellt werden.

Minimiert wird die Summe aus dem maximal auftretenden seitlichen Versatz während des Ausweichmanövers $y_{E,\max}$, der maximal auftretenden Querschleunigung $a_{y,\max}$ sowie der verbleibenden Restkollisionswahrscheinlichkeit p_{coll} . Die Koeffizienten a_0 , a_1 und a_2 gewichten dabei den Einfluss der verschiedenen Optimierungskriterien. Die Nebenbedingungen stellen sicher, dass die Trajektorie im Ausweichkorridor, der durch die Menge \mathcal{C} beschrieben wird, verbleibt und dass eine maximal zulässige Kollisionswahrscheinlichkeit $p_{\text{coll,lim}}$ sowie die maximal zulässige Querschleunigung $a_{y,\text{lim}}$ nicht überschritten werden. Darüber hinaus legen weitere Nebenbedingungen fest, dass am Ende des Ausweichmanövers die Orientierung des Fahrzeugs jener zu Beginn des Manövers entspricht und die

Gierrate null ist. Schließlich wird die Stetigkeit der Ausweichtrajektorie bezüglich Lateralversatz, Gierwinkel, Gierrate, und ggf. höherer Ableitungen von f zum Zeitpunkt $t = 0$ gewährleistet.

Im Folgenden wird dieses Optimierungsproblem vereinfacht, indem die Kollisionswahrscheinlichkeit zunächst nicht minimiert, sondern auf einen festen Wert gesetzt wird. Bei geeigneter Wahl der Darstellung der prädizierten Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Fußgängers kann dadurch der Lateralversatz y_P des Fahrzeugs auf Höhe des Fußgängers x_P in Abhängigkeit von \mathbf{c} bestimmt werden. Des Weiteren wird angenommen, dass die Parameter \mathbf{c} ausschließlich linear in der Funktion $f(x, \mathbf{c})$ auftreten. Dies kann erreicht werden, indem $f(\cdot)$ als gewichtete Summe aus Basisfunktionen dargestellt wird; ein einfaches Beispiel hierfür ist ein Polynom (vgl. z.B. [2]). Unter einigen vereinfachenden Annahmen, die für den Anwendungsfall einer Ausweichtrajektorienplanung ohne bedeutende Einschränkung getroffen werden können, resultiert schließlich ein lineares Optimierungsproblem, das sehr effizient gelöst werden kann. Eine Vereinfachung besteht darin, die Nebenbedingung

$$(x(t, \mathbf{c}), y(t, \mathbf{c})) \in \mathcal{C} \quad \forall t,$$

zu relaxieren und lediglich an Stützstellen $(x_{i,c}, y_{i,c})$ bzw. $(x_{j,c}, y_{j,c})$ entlang des Ausweichkorridors darzustellen:

$$\begin{aligned} f(x_{i,c}, \mathbf{c}) &\leq y_{i,c}, \\ f(x_{j,c}, \mathbf{c}) &\geq y_{j,c}, \end{aligned}$$

was unter obiger Annahme auf lineare Nebenbedingungen führt. Bei ausreichend eng gewählten Stützstellen und unter Annahme eines entsprechend glatten Verlaufs der Ausweichtrajektorie wird auch die ursprüngliche Nebenbedingung erfüllt. Um das ursprüngliche Optimierungsproblem zu lösen, wird das vereinfachte Problem unter Variation von p_{coll} schließlich iterativ im Rahmen eines line-search-Verfahrens gelöst.

Unter Umständen existiert keine Lösung für das Optimierungsproblem. Dies kann verschiedene Ursachen haben, wie z.B. fehlender Raum zum Ausweichen etwa aufgrund eines entgegenkommenden Fahrzeugs. Eine weitere Möglichkeit ist, dass an dem Fußgänger mit dem gewünschten Sicherheitsabstand und unter den gegebenen fahrdynamischen Möglichkeiten nicht mehr vorbei gefahren werden kann. In diesen Fällen wird der Fahrer, auch wenn er ein Ausweichmanöver initiiert, lediglich durch eine automatische Notbremsung im Falle der Unvermeidbarkeit der Kollision unterstützt.

Wird eine Ausweichtrajektorie gefunden und darüber hinaus der Ausweichwunsch des Fahrers wie in Abschnitt 3 beschrieben erkannt, so wird fortwährend die relative Position des Ego-Fahrzeugs zur geplanten Ausweichtrajektorie bestimmt und ein entsprechendes Lenkmoment gestellt, um den Fahrer während des Ausweichmanövers auf der kollisionsvermeidenden Trajektorie zu stabilisieren.

5 Evaluierung der Wirksamkeit des Systems

Die Wirksamkeit des vorgestellten Systems wurde in einer aus zwei Teilen bestehenden Probandenstudie evaluiert [5]. Dazu wurden Fahrversuche mit einem Versuchsfahrzeug auf einer abgesperrten Teststrecke durchgeführt. Ziel des ersten Versuchsteils war es, zu quantifizieren, welcher Anteil der Autofahrer bei einer kurz bevorstehenden Kollision mit

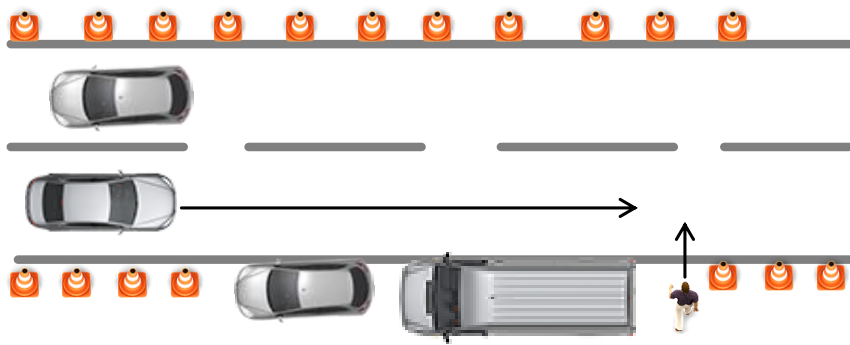


Abbildung 3: Situation, die im Rahmen der Probandenstudie zur Evaluierung der Wirksamkeit einer Lenkunterstützung bei drohender Kollision mit Fußgängern durchfahren wurde.

einem Fußgänger eine Ausweichreaktion am Lenkrad zeigen. Zum anderen sollte festgestellt werden, bei welchem Teil dieser Fälle der Fahrer in der Lage ist die Kollision mit dem Fußgänger durch ein Ausweichmanöver zu vermeiden.

Dazu wurden 31 Fahrer mit einem unerwartet hinter einem geparkten Fahrzeug auftauchenden Fußgängerdummy konfrontiert. Das Szenario war so gestellt, dass der Dummy erst kurz vor der Kollision für den Fahrer sichtbar wurde, sodass sich die Kollision bei der gefahrenen Geschwindigkeit von ca. 50 km/h nicht durch Bremsen alleine, sondern nur durch ein Ausweichmanöver vermeiden ließ. Die Abbildungen 3 und 4 zeigen das Szenario aus der Vogelperspektive und aus der Perspektive des Probanden.

Der eigentliche Versuchszweck wurde den Probanden nicht mitgeteilt. Vielmehr wurden die Teilnehmer zu Beginn der Fahrversuche dahingehend instruiert, dass Ziel des Fahrversuchs die Ermittlung des Fahrverhaltens beim Durchfahren von Engstellen ist. Die Probanden fuhren dann zunächst mit verschiedenen Geschwindigkeiten durch den Parcours, ohne dass der Fußgängerdummy sichtbar war. Erst bei der vierten Durchfahrt erschien dieser für die Probanden unerwartet hinter einem geparkten Fahrzeug, wobei die TTC bei Sichtbarwerden des Dummies ca. 0,8s - 1,0s betrug.

Das wesentliche Ergebnis dieses ersten Studienteils war, dass nur sehr wenige Proban-



Abbildung 4: Blick aus dem Fahrzeug, das in der Probandenstudie eingesetzt wurde.

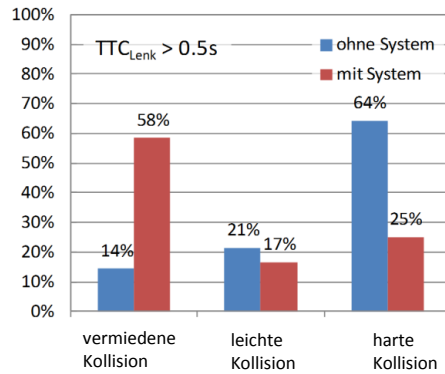


Abbildung 5: Vergleich der Vermeidungsrate der Kollision für Fahrer mit Lenkreaktion bei $TTC_{Lenk} > 0.5s$ mit Ausweichunterstützung (12 Probanden) aus dem zweiten Teil der Studie und ohne Ausweichunterstützung (14 Probanden) aus dem ersten Teil der Studie.

den die Kollision mit dem Fußgängerdummy vermeiden konnten, obwohl fast alle Fahrer eine Ausweichreaktion zeigten. Verwendet man den in Abschnitt 3 beschriebenen Klassifikator zur Erkennung der Ausweichabsicht, so initiierten 26 Probanden (84%) zwar ein Ausweichmanöver, von diesen konnten jedoch nur 2 die Kollision mit dem Fußgängerdummy tatsächlich vermeiden. Abbildung 2 zeigt die Verläufe von Lenkwinkel und Lenkwinkelgeschwindigkeit von zwei Probanden kurz vor der Kollision, die sich als typisch für den Versuch herausstellten: Während Fahrer 1 zu früh zurücklenkt und so nicht ausreichend Querversatz für die Kollisionsvermeidung aufbaut, lenkt Fahrer 2 von vorne herein zu wenig, um die Kollision vermeiden zu können.

Im zweiten Teil der Studie wurde mit weiteren Probanden dasselbe Kollisionsszenario unter denselben Bedingungen gestellt, allerdings war bei 21 Probanden nun die beschriebene Ausweichunterstützung aktiv. Wieder waren die Probanden nicht auf einen querenden Fußgängerdummy gefasst, der nach einigen Durchfahrten hinter der Verdeckung hervortrat. Es zeigte sich, dass im Gegensatz zum ersten Teil der Studie nun ein großer Anteil

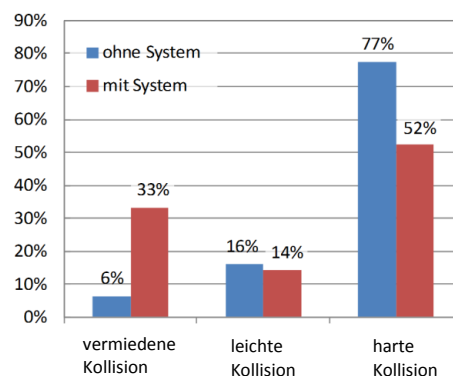


Abbildung 6: Vergleich der Vermeidungsrate der Kollision mit Ausweichunterstützung (21 Probanden) aus dem zweiten Teil der Studie und ohne Ausweichunterstützung (31 Probanden) aus dem ersten Teil der Studie.

der Probanden mit Hilfe des Systems die Kollision mit dem Fußgängerdummy vermeiden konnte. Dies gilt insbesondere für Probanden, die das Ausweichmanöver bei einer TTC größer als 0,5 Sekunden einleiteten. Für diese 12 Probanden zeigt Abbildung 5 den Vergleich der Kollisionshäufigkeit mit und ohne System; während lediglich 14% dieser Probanden ohne System die Kollision vermeiden konnten, waren mit dem beschriebenen System 58% in der Lage die Kollision mit dem Fußgängerdummy vollständig zu vermeiden. Bezieht man alle 21 Probanden in die Auswertung mit ein bei denen die Ausweichunterstützung aktiv war, also auch jene die ein Ausweichmanöver erst sehr spät bei einer TTC kleiner als 0,5 Sekunden einleiteten, dann ergibt sich die Verteilung in Abbildung 6. Mit einer Steigerung des Anteils an vermiedenen Kollisionen von 6% ohne System auf 33% mit System ist der Nutzen der Ausweichunterstützung auch hier deutlich erkennbar, wenngleich er durch die zum Teil zu kurze verbleibende Zeit zur wirksamen Beeinflussung der gefahrenen Trajektorie durch das System etwas geschmälert wird. Auch im Vergleich der von den Probanden gefahrenen durchschnittlichen Ausweichbreite auf Höhe des Fußgängerdummys zeigt sich die Wirksamkeit des Systems: diese stieg von 40 cm ohne System auf 75 cm mit Ausweichunterstützung.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag stellt ein Fahrerassistenzsystem zur Vermeidung von Unfällen mit Fußgängern vor, das den Fahrer während eines Ausweichmanövers unterstützt. Reagiert der Fahrer bei einer kritischen Annäherung am Lenkrad mit einer Ausweichbewegung, so wird die Ausweichunterstützung aktiviert und der Fahrer durch Überlagerung von Lenkmomenten auf einer optimalen Ausweichtrajektorie stabilisiert. Das System verwendet eine Stereo-Video-Kamera um Fußgänger, statische Hindernisse und weitere relevante Verkehrsteilnehmer wie etwa Gegenverkehr zu erkennen. Seitlich fahrende Verkehrsteilnehmer außerhalb des Erfassungsbereichs der Stereo-Kamera können mit Hilfe von Seitensensoren erfasst werden. Die Wirksamkeit des Systems wurde im Rahmen einer Probandenstudie nachgewiesen.

Eine wichtige Komponente des Systems ist die Prädiktion der relevanten Verkehrsteilnehmer, also sowohl die Prädiktion des Verkehrs, der potentiell die Ausweichmöglichkeiten einschränkt, als auch die Prädiktion des gefährdeten Fußgängers. Die künftige Entwicklung wird sich auf die Verbesserung von Letzterem konzentrieren, indem z.B. Merkmale des Fußgängers wie die Kopforientierung (vgl. z.B. [7, 8]) in der Prädiktion berücksichtigt werden.

Literatur

- [1] OECD/ITF: Road Safety Annual Report 2014. (OECD Publishing)
- [2] Keller, C.G., Dang, T., Fritz, H., Joos, A., Rabe, C., Gavrila, D.M.: Active pedestrian safety by automatic braking and evasive steering. *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on* **12**(4) (2011) 1292–1304

- [3] Braeuchle, C., Flehmig, F., Rosenstiel, W., Kropf, T.: Maneuver decision for active pedestrian protection under uncertainty. In: 16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). (2013) 646–651
- [4] Braeuchle, C., Flehmig, F., Rosenstiel, W., Kropf, T.: Driver influence on active pedestrian protection systems with combined braking and steering. In: Proceedings of 2nd International Symposium on Future Active Safety Technology towards Zero-Traffic Accident (FAST-zero 13). (2013) 1–6
- [5] Marberger, C., Gußner, T., Bürkle, L.: Evaluation einer Lenkassistentenfunktion zum Schutz gefährdeter Fußgänger. In: 8. VDI-Tagung Fahrer im 21. Jahrhundert, VDI (2015) als Beitrag angenommen
- [6] Fausten, M.: Accident avoidance by evasive manoeuvres. 4. Tagung Sicherheit durch Fahrerassistenz (TVSD, Munich, April 15–16) (2010)
- [7] Flohr, F., Dumitru-Guzu, M., Kooij, J.F., Gavrilă, D.M.: Joint probabilistic pedestrian head and body orientation estimation. In: Intelligent Vehicles Symposium Proceedings, 2014 IEEE, IEEE (2014) 617–622
- [8] Schulz, A., Stiefelhagen, R.: Pedestrian intention recognition using latent-dynamic conditional random fields. In: Intelligent Vehicles Symposium Proceedings, 2015 IEEE, IEEE (2015) 622–627