

Haptische Ausweichempfehlungen in Kollisionssituationen: Effektivität und Aspekte der Kontrollierbarkeit

Andro Kleen und Gerrit Schmidt

Schlüsselwörter: Mensch-Maschine-Interaktion, Kollisionswarnungen, Kontrollierbarkeit, Warnkonzept, Fahrerassistenzsystem.

Zusammenfassung

Kollisionen mit vorausfahrenden Fahrzeugen gehören zu den häufigsten Unfalltypen im Verkehrsgeschehen. Unfälle dieser Art werden oftmals durch unaufmerksame Fahrer verursacht und könnten durch effektive Warnkonzepte verhindert werden. In zwei Simulatoruntersuchungen wurden die Effektivität und die Kontrollierbarkeit einer haptisch vermittelten Ausweichempfehlung zur Verhinderung vermeidbarer Auffahrunfälle untersucht. Diese Ausweichempfehlung wurde über ein gerichtetes Lenkmoment in Richtung einer freien Fahrbahn unmittelbar vor einer simulierten Kollision umgesetzt. Dadurch wird nicht nur die Aufmerksamkeit des Fahrers auf die Situation gelenkt, sondern gleichzeitig eine Handlung zur Deeskalation der Situation empfohlen. Die Ergebnisse weisen deutlich auf das Potenzial dieser Handlungsempfehlungen in kritischen Situationen hin. So konnte in den untersuchten Situationen eine signifikante Verringerung der Unfallhäufigkeit beobachtet werden. Bei Probanden, denen die Ausweichempfehlung in Richtung entgegenkommender Fahrzeuge ausgegeben wurde, konnten dagegen keine veränderten Verhaltensweisen festgestellt werden.

In today's road traffic, rear end collisions with the preceding vehicle represent a very frequent accident type. Very often, these accidents are caused by inattentiveness and driver distraction. Therefore, current research and first systems on the market focus on warning strategies to guide the driver's attention as soon as a critical situation is detected. In this paper, a warning concept is described which not only informs the driver about the criticality of the current situation but additionally provides a recommendation for an appropriate driver action to de-escalate the situation. In two studies in a fixed-based driving simulator the general applicability of the suggested warning concept is investigated. The results show the potential of these recommendations in the form of directed steering torque signals: By applying a steering torque signal in a critical situation, the number of accidents was significantly reduced in the investigated setting. In the second study, the signal was applied under the condition of oncoming traffic. Here, an effect on the behaviour of the driver due to the applied recommendation was not observed.

Theoretischer Hintergrund

Auffahrunfälle und Kollisionen im Längsverkehr stellen nach wie vor einen erheblichen Anteil des Verkehrs- und Unfallgeschehens dar (Vorndran, 2007). Die Verringerung der damit verbundenen Personen- und Sachschäden ist eine wesentliche Motivation zur Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen (FAS), die Kollisionen gänzlich vermeiden oder zumindest die Unfallschwere deutlich verringern sollen. Mehrere Automobilhersteller bieten mittlerweile so genannte Bremsassistenten an (z.B. VW FrontScan oder Audi Breaking Guard), die in der Regel radargestützt kritische Abstandssituationen detektieren und ggf. Warnungen zur Kollisionsvermeidung einleiten.

Das hier vorgestellte Warnkonzept soll neben der bloßen Information des Fahrers über eine drohende Kollision zusätzlich die Ausführung eines Ausweichmanövers einleiten und so Kollisionssituationen deeskalieren. Eigene Untersuchungen weisen darauf hin, dass Fahrer eines

Kraftfahrzeuges auch vermeidbare Kollisionen selten durch ein Ausweichmanöver verhindern und durch ausschließliche Bremsreaktionen eigentlich abwendbare Unfälle verursachen. Kern der hier untersuchten Warnstrategie ist ein kurzes, unmittelbar vor einer simulierten Kollision ausgegebenes gerichtetes Lenkmoment. Das Lenkmoment soll fahrerbasierte Ausweichmanöver begünstigen und ist derart gestaltet, dass es die Fahrtrajektorie nicht wesentlich beeinflusst. Im Unterschied zu klassischen Warnkonzepten soll nicht nur die Aufmerksamkeit auf eine kritische Situation gelenkt, sondern auch eine Handlungsalternative aufgezeigt werden.

Durch die haptischen Handlungsempfehlungen werden insbesondere in kritischen Situationen verschiedene Vorteile gegenüber klassischen Warnungen erwartet. Mit der Empfehlung einer deeskalierenden Handlung wird eine erhöhte Wahrscheinlichkeit von kollisionsvermeidenden Fahrerreaktionen erwartet. Gleichzeitig verbleibt die Verantwortung für die Handlungsausführung und deren Folgen beim Fahrer.

Das hierbei verwendete Signal soll aufgrund der haptischen Auslegung Interferenzen in der Informationsverarbeitung vermeiden. In Anlehnung an das Aufmerksamkeitsmodell der Multiplen Ressourcen nach Wickens (1984) soll durch das haptisch vermittelte Signal versucht werden, auf weniger beanspruchte Aufmerksamkeitsressourcen zurückzugreifen und somit die in der Regel stärker beanspruchten visuellen und akustischen Aufmerksamkeitskapazitäten zu entlasten. (z.B. Hughes und Cole, 1986, Antin et al., 1990). Wickens Modell zur Folge sollte insbesondere die Reiz-Reaktions-Kompatibilität (z.B. Fitts & Steeger G.M., 1953) von zu verarbeitender Information (manual/spatial) und auszuführender Reaktion (manual/spatial) zu schnellen und interferenzfreien Reaktionsleistungen führen. Demnach eignen sich haptische Signale in der Lenkung zur Empfehlung einer manuell am Lenkrad auszuführenden Handlung besonders.

Dabei soll die gerichtete Ausgabe der Empfehlung dem Fahrer eine deeskalierende Handlungsalternative zu einem bloßen Bremsmanöver zur Verfügung stellen. In Anlehnung an die mehrfach nachgewiesenen Effekte von Priming-Prozessen (neurophysiologische Bahnungsprozesse) wird hierbei vermutet, dass Bewegungen des Lenkrads nicht präsente Gedächtnisinhalte (Lenkbewegungen/die Möglichkeit eines Ausweichmanövers) aktualisieren können. Kiesel, Kunde und Hoffmann (2007) wiesen motorische Vorbereitungsprozesse schon direkt im Anschluss an ankündigende Prime-Reize über Analysen des lateralisierten Bereitschaftspotenzials (LRP) nach. Weitere Studien zu „räumlichen Handlungsvorbereitungen“ belegen, dass Vorinformationen über eine auszuführende Handlung mit verkürzten Latenzen des reaktionsbezogenen LRPs einhergehen. Innerhalb dieser Voraktivierungen werden demnach insbesondere Prozesse der Reaktionsauswahl unterstützt und vorbereitet.

Neben Analysen der Effektivität einer haptischen Ausweichempfehlung ist die Untersuchung der Kontrollierbarkeit (Controllability) einer solchen Signalgebung ein wesentliches Anliegen der vorliegenden Arbeit. Der Aspekt der Kontrollierbarkeit wird im RESPONSE Code of Practice (RESPONSE Consortium, 2006) als zentrales Evaluierungskonzept für die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen ausgewiesen. So werden verschiedene Verfahren zur Bewertung der Beherrschbarkeit neuer Fahrzeugsysteme, z.B. Expertenbeurteilungen oder empirische Herangehensweisen, vorgeschlagen. Hierbei wird im Wesentlichen auf die Gestaltung und Prüfung fraglicher Fahrsituationen durch Simulationstools oder durch Tests im Realfahrzeug verwiesen. Aktuelle Diskussionen beziehen sich unter anderem auf die Aussagekraft verschiedener Bewertungskriterien (z.B. Neukum et al., 2008).

Mit der Bearbeitung besonders beanspruchender Szenarien sollen Erkenntnisse über Systeminteraktionen und angemessene Fahrerreaktionen schon in sehr frühen Phasen gewonnen werden. Ein mögliches Szenario für das hier dargestellte Warnkonzept stellt die Ausgabe einer gerichteten Lenkempfehlung bei Gegenverkehr dar. Hierbei kann geprüft werden, inwieweit sich Fahrer in Kollisionssituationen noch der Existenz von Gegenverkehr bewusst sind und einer unangebrachten Ausweichempfehlung nicht Folge leisten. Vor diesem Hintergrund kön-

nen erste Erkenntnisse über die Anforderungen einer solchen Handlungsempfehlung gewonnen werden. Es wird allerdings darauf hingewiesen, dass es sich bei dem untersuchten System um einen reinen Forschungsaufbau handelt, dessen Auslegungen in einer Simulatorumgebung untersucht werden.

Untersuchungsmethode

Um die Effektivität und Kontrollierbarkeit einer haptisch vermittelten Ausweichempfehlung zu beleuchten, wurde in zwei Untersuchungen ein Folgeszenario an einem feststehenden Simulator realisiert. Durch ein unerwartet bremsendes Führungsfahrzeug wurde hierbei eine Kollisionssituation provoziert, die durch ein alleiniges Bremsmanöver nicht mehr zu vermeiden war. Die Probanden wurden zu Beginn der Untersuchung instruiert, dem Führungsfahrzeug auf der rechten Fahrbahn einer zweispurigen Landstraße zu folgen. Währenddessen sollte ein Abstand von ca. 50 m eingehalten werden. Die linke Fahrbahn blieb hierbei frei. Das Bremsmanöver wurde vom Versuchsleiter nach einer Mindestfahrdauer ausgelöst, wenn eine Geschwindigkeit zwischen 135 und 145 km/h eingehalten wurde und der zeitliche Abstand zum Führungsfahrzeug zwischen 2,5 und 1,7 Sekunden betrug. Um verlässliche Situationen zu erzeugen, die durch ein Bremsmanöver nicht mehr kollisionsfrei zu lösen waren, wurde die Verzögerung des Führungsfahrzeugs mit sehr großer negativer Beschleunigung von -15m/s^2 umgesetzt. Eine Kollision konnte in diesen Situationen nur durch ein Ausweichmanöver verhindert werden.

Nachdem das Bremsmanöver des Führungsfahrzeugs ausgelöst wurde, erfolgte die Auslösung des Signals in Abhängigkeit der Größe der zur Vermeidung einer Kollision erforderlichen Bremsverzögerung. Als Auslöseschwelle wurde eine notwendige Verzögerung von -10m/s^2 definiert. Die Überschreitung dieses Schwellenwerts führte zu einem deutlich überschwelligen Lenkmomentimpuls in Richtung der linken Fahrbahn. Um zu große Auslenkungen zu verhindern, wurde die Stärke des angeforderten Lenkmoments begrenzt. Zudem wurde die maximale Auslenkung des Lenkrads auf einen Winkel von -10° , die Dauer der anliegenden Kraft auf einen Zeitraum von 300 ms begrenzt. Die Überschreitung eines dieser Kriterien führte zum Abbruch des Zusatzlenkmoments. Durch die Definition solcher strenger Gestaltungsmerkmale wurde sichergestellt, dass die Aufschaltung des Lenkmoments auch dann nur zu einem Minimum an Querabweichung des Fahrzeugs führt, wenn sich aktuell keine Hände am Lenkrad befinden.

In einer ersten Studie wurde eine Experimentalgruppe (EG 1, $n=30$) dieser Kollisionssituation mit anschließender haptischer Ausweichempfehlung ausgesetzt. Probanden einer Kontrollgruppe (KG 1, $n=27$) erhielten in der gleichen Kollisionssituation keine Empfehlung. In einer zweiten Studie wurde zwei Versuchsgruppen die identische Situation bei zusätzlicher Simulation von Gegenverkehr dargeboten. Auch hier wurde einer Experimentalgruppe (EG 2, $n=15$) eine haptische Ausweichempfehlung ausgegeben, allerdings in Richtung entgegenkommender Fahrzeuge. Eine weitere Kontrollgruppe (KG 2, $n=15$) absolvierte die Kollisionssituation ohne ein solches Signal. Eine Kollision war in dieser Studie nicht durch ein Ausweichen in Richtung der linken Fahrbahn zu verhindern. Als Maße der Fahrleistung und des subjektiven Erlebens der Probanden wurden Daten verschiedener Ebenen erhoben: Als einfachste Klassifikation der Fahrleistungen wurden Verhaltensweisen des Fahrers (Lenkbewegungen, Kollisionen und Bremsmanöver) nach „aufgetreten“ / „nicht aufgetreten“ protokolliert. Durch die Berechnung verschiedener fahrphysikalischer Kennwerte wurden die Fahrerreaktionen zudem quantifiziert.

Bezüglich der statistischen Analyse muss an dieser Stelle auf eine Besonderheit der Testlogik hingewiesen werden. Um eindeutig ausbleibende Effekte der haptischen Empfehlung bei Gegenverkehr nachweisen zu können, müssten *gleiche* Häufigkeiten bzw. die Richtigkeit der H_0 -Hypothese nachgewiesen werden. Da die spezifischen Anforderungen von Äquivalenztests hier nicht gegeben sind, soll die β -Fehler-Wahrscheinlichkeit hier indirekt, über eine Erhöhung des α -Niveaus, minimiert werden. Für die Festlegung einer entsprechenden β -Fehler-Wahrscheinlichkeit als Entscheidungskriterium haben sich nach Bortz und Döring (2006) al-

ledings noch keine Konventionen durchgesetzt. Im Folgenden wird daher $\alpha > 20\%$ lediglich als Hinweis auf gleiche Häufigkeiten bzw. gleich große Ausprägungen untersuchter Merkmale verstanden. Häufigkeiten von Fahrerreaktionen wurden durch Berechnung des Mann-Whitney-U-Tests verglichen, fahrphysikalische Kennwerte und subjektive Bewertungen durch T-Tests für unabhängige Stichproben.

Untersuchungsergebnisse

In Abbildung 1 sind die Häufigkeiten der beobachteten Fahrerreaktionen in Abhängigkeit der Versuchsbedingungen dargestellt. Aufgrund der ungleichen Größen der Versuchsgruppen erfolgen die Angaben der Häufigkeiten auch hier in Prozent.

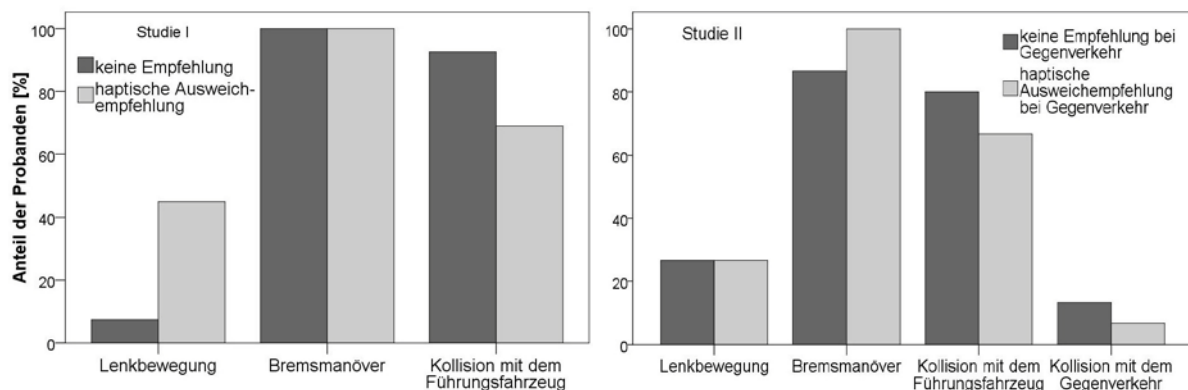


Abb. 1: Prozentuale Häufigkeiten der Fahrerreaktionen beider Studien in Abhängigkeit der Versuchsbedingungen.

Probanden, denen unmittelbar vor der Kollision eine haptische Ausweichempfehlung dargeboten wurde, zeigten im Vergleich zur Kontrollgruppe signifikant häufiger Lenkbewegungen ($p=.002$) und konnten eine Kollision mit dem Führungsfahrzeug signifikant häufiger verhindern ($p=.032$). Vergleiche der fahrphysikalischen Kennwerte (Abbildung 2) und der subjektiven Reaktionsbewertungen weisen ebenfalls hierauf hin. In diesem Zusammenhang sind vor allem ein tendenziell größerer maximaler Lenkwinkel ($p=.076$) und ein subjektiv stärker bewertetes Lenken der Experimentalgruppe ($p<.001$) im Vergleich zur Kontrollgruppe zu nennen. Die Erhebung der subjektiven Daten erfolgten hierbei auf einer 16-stufigen Kategorienunterteilungsskala. Demgegenüber konnten keine veränderten Häufigkeiten und Qualitäten der Bremsmanöver beobachtet werden. Sowohl der mittlere maximale Bremspedalweg als auch die mittleren Bremsreaktionszeiten zeigten sich nach Ausgabe der Lenkempfehlung im Vergleich zur Kontrollgruppe unverändert ($p=.137$ und $p=.835$).

Um die Auswirkungen der haptischen Ausweichempfehlung unter Gesichtspunkten der Kontrollierbarkeit zu untersuchen, wurden die Häufigkeiten der Fahrerreaktionen von Experimental- (EG 2) und Kontrollgruppe (KG 2) der Gegenverkehrsbedingungen miteinander verglichen. Der Vergleich der Versuchsgruppen zeigte deutlich, dass die Darbietung der haptischen Ausweichempfehlung bei Gegenverkehr offenbar nicht mit einer erhöhten Häufigkeit von unerwünschten Verhaltensweisen einhergeht. Die in diesem Zusammenhang besonders wichtigen Vergleiche der Kollisionshäufigkeiten mit dem Gegenverkehr ($p=.550$) und der Ausweichmanöver nach rechts ($p=.417$) zeigen keine Auswirkungen der Ausweichempfehlung. Gleiches gilt für den Vergleich der übrigen Verhaltensweisen. Diese unveränderten Häufigkeiten der verschiedenen Reaktionen sprechen dafür, dass der Einsatz einer haptischen Ausweichempfehlung in Richtung des Gegenverkehrs nicht zu einer Eskalation der Kollisionssituation führte. Hierauf deuten auch Vergleiche der fahrphysikalischen Kennwerte und Vergleiche der subjektiven Situationsbewertung hin.

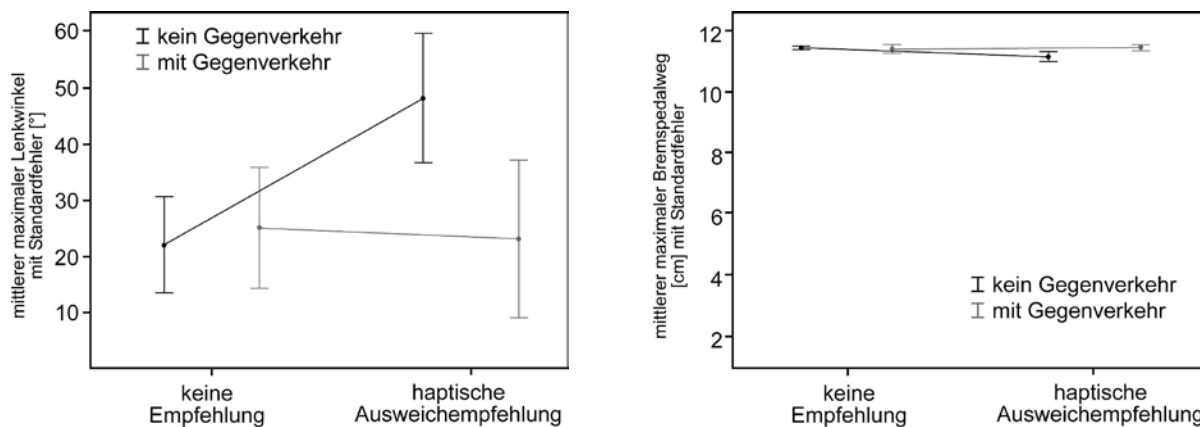


Abb. 2: Darstellung der mittleren maximalen Lenkwinkel (links) und der mittleren maximalen Bremspedalwege (rechts) in Abhängigkeit der Ausweichempfehlung und des Gegenverkehrs. Als Streuungsmaß ist der Standardfehler dargestellt.

Es fanden sich weder signifikant veränderte maximale Bremspedalwege ($p=.837$), Lenkwinkel ($p=.912$) oder veränderte Bremsreaktionszeiten ($p=.479$) nach Ausgabe der haptischen Ausweichempfehlung bei Gegenverkehr. Die Bewertung der eigenen Brems- und Lenkstärke ($p=.414$ bzw. $p=.606$) sowie der wahrgenommenen Ausweichmöglichkeiten unterschieden sich ebenfalls nicht von denen der Kontrollgruppe ($p=.544$). Die durchgängig hohen β -Fehler-Wahrscheinlichkeiten können als Hinweis auf gleiche Häufigkeiten bzw. Ausprägungen verstanden werden. Negative Auswirkungen auf das Fahrer-Fahrzeug-System konnten hier nicht gefunden werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Zentraler Gegenstand der hier besprochenen Studien sind haptische Warnstrategien zur Verhinderung vermeidbarer Auffahrunfälle. Zur Unterstützung eines vom Fahrer durchgeführten Ausweichmanövers wurde unmittelbar vor einer simulierten Kollision mit einem Führungsfahrzeug ein gerichtetes Lenkmoment von geringer Dauer und mittlerer Intensität in Richtung einer freien, linken Fahrbahn ausgegeben. Hierbei standen einerseits positive Effekte im Sinne eines angebrachten Ausweichmanövers, andererseits mögliche negative Auswirkungen, z.B. ein verändertes Bremsverhalten, im Fokus der Untersuchung. In einer zweiten Untersuchung wurde die haptische Ausweichempfehlung in einer Kollisionssituation mit entgegenkommenden Fahrzeugen unter der Verwendung identischer Signalparameter dargeboten. Hieraus sollten erste Erkenntnisse über die Kontrollierbarkeit einer haptischen Ausweichempfehlung ermöglicht werden. Durch die oben beschriebenen Herangehensweisen sollten neben Fragen der Effektivität schon in sehr frühen Entwicklungsstadien Aspekte der Kontrollierbarkeit evaluiert werden, um ggf. wichtige Ableitungen für das hier untersuchte Warnkonzept vornehmen zu können. Im Hinblick auf die Kontrollierbarkeit der Ausweichempfehlung konnten ebenfalls keine negativen Effekte identifiziert werden.

Die signifikanten Zunahmen von kollisionsvermeidenden Verhaltensweisen nach Ausgabe der Ausweichempfehlung sprechen deutlich für das Potenzial haptisch vermittelter Signale. Grundsätzlich kann der Fahrer auf diese Weise bei der Auswahl einer effektiven Handlungsmöglichkeit für kritische Situationen unterstützt werden. So können in einigen Fällen vermeidbare Kollisionen mit einem vorausfahrenden Fahrzeug verhindert werden. Als Folge einer solchen Ausweichempfehlung konnten in den vorliegenden Untersuchungen keine negativen Effekte, wie z.B. veränderte Bremsreaktionen, festgestellt werden. Zudem konnten Probanden, denen ein Ausweichmanöver in Richtung entgegenkommender Fahrzeuge empfohlen wurde, die Empfehlung und sich daran anschließende Handlungen problemlos kontrollieren.

Diese unveränderte Qualität der Fahrerreaktion könnte für eine weitgehend interferenzfreie Verarbeitung der Handlungsempfehlung sprechen. Hierauf deuten auch die unveränderten Bremsreaktionszeiten der haptisch informierten Fahrer hin. Da die Prozesse der Informationsverarbeitung in der vorliegenden Studie zugunsten einer Evaluation des Gesamtkonzepts nicht im strengen Sinne operationalisiert wurden, sind diese Fragen in weiteren Untersuchungen zu klären.

Die oben diskutierten Ergebnisse verdeutlichen das Potenzial des hier vorgestellten Warnkonzepts. Der Einsatz von gerichteten haptischen Signalen scheint die Ausführung von Ausweichmanövern zu unterstützen und Handlungsalternativen bereitzustellen. Weiterführende Fragestellungen könnten systematische Variationen von Intensität und Richtung der Ausweichempfehlung, die Kombinationen verschiedener Warnmodalitäten sowie Untersuchungen in beweglichen Fahrsimulatoren oder in Realfahrzeugen betreffen.

Literatur

- Antin, J.F., Dingus, T. A., Hulse, M.C., & Wierwille, W.W. (1990). An evaluation of the effectiveness and efficiency of an automobile moving map navigational display. *International Journal of Machine Studies*, 33, 581-594.
- Bortz, J. & Doring, N. (2006). *Forschungsmethoden und Evaluation für Human und Sozialwissenschaftler*. Berlin: Springer.
- Fitts, P.M. & Steeger, C.M. (1953). S-R compatibility: spatial characteristics of stimulus and response codes. *Journal of Experimental Psychology*, 46, 199-210.
- Hughes, P. K. & Cole, B. L. (1986). What attracts attention when driving? *Ergonomics*, 29, 377-391.
- Kiesel, A., Kunde, W. & Hoffmann, J. (2007). Mechanisms of subliminal response priming. *Advances in Cognitive Psychology*, 3, 307-315.
- Misener, J.A., Tsao, H.-S. J., Song, B., & Steinfeld, A. (2000). Emergence of a cognitive car-following driver model: Application to rear-end crashes with a stopped lead vehicle. *Transportation Research Record – Journal of the Transportation Research Board* 1724.
- Neukum, A. Lübbecke, T., Krüger, H.-P. Mayser, C., & Steinle, J. (2008). ACC-Stop&Go: Fahrerverhalten an funktionalen Systemgrenzen. In M. Maurer & C. Stiller (Hrsg.), *5. Workshop Fahrerassistenzsysteme – FAS 2008* (S. 141-150). Karlsruhe: fmrt.
- RESPONSE Consortium. (2006). Code of Practice for the design and evaluation of ADAS. RESPOSNE III: a PReVENT Project.
- Vorndran, I. (2007). *Unfallgeschehen im Straßenverkehr 2006*. Verfügbar unter: <http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Content/Publikationen/Querschnittsveroeffentlichungen/WirtschaftStatistik/Verkehr/Unfallgeschehen-strassenverkehr2006,property=file.pdf> [02. Juli 2009].
- Wickens, C.D. (1984). Processing Resources in Attention. In R. Parasuraman (Hrsg.), *Varieties of Attention* (S. 63 – 102). London: Academic Press.