

Wirksamkeit von Ausweichempfehlungen in Kombination mit Teilbremsung beim Notausweichen

Markus Sieber¹, Marc Schneider², Andreas Siegel³,
Karl-Heinz Siedersberger⁴, Berthold Färber⁵

Zusammenfassung: Rechtzeitige und adäquate Lenkreaktionen haben das Potenzial, eine Vielzahl von Unfällen im Straßenverkehr zu verhindern. So könnten beispielsweise Fahrerassistenzsysteme im Bereich der aktiven Sicherheit mittels Ausweichempfehlungen dazu beitragen, die Sicherheit zu erhöhen. In vier Szenarien wurde auf einer Teststrecke die Wirksamkeit eines Lenkradmoments bzw. einer einseitigen Bremsung als Ausweichempfehlung in Kombination mit einer Teilverzögerung beim Notausweichen mit geringem Querversatz getestet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Ausweichempfehlungen in den untersuchten Szenarien zwar keinen signifikanten Vorteil bieten, aber tendenziell einen positiven Einfluss ausüben. Bei belegtem Gegenfahrstreifen oder einer unberechtigten Systemauslösung erweisen sich die getesteten Systemeingriffe weitgehend als beherrschbar.

Schlüsselwörter: Aktive Sicherheit, Ausweichempfehlung, Fahrerassistenz

1 Einleitung

Um der „Vision Zero“ [1], dem Ziel einer Reduktion der Verkehrstotenzahlen auf Null, nahe kommen zu können, sind Konzepte der aktiven Sicherheit erforderlich, die Unfälle nicht nur in ihren Folgen abzumildern suchen, sondern ihr Zustandekommen vollständig verhindern. Dabei spielen Fahrerassistenzsysteme eine Schlüsselrolle. Sie können den Fahrer in seiner Fahraufgabe unterstützen und helfen, Fehlverhalten zu vermeiden, das beispielsweise im Jahre 2010 auf deutschen Straßen bei mehr als 80% der Unfälle als Ursache identifiziert wurde [2].

Fahrerassistenzsysteme können dabei beide Strategien der Kollisionsvermeidung – Bremsen und Lenken – unterstützen. Im Fall der Längsführung reicht dies in der Praxis (z.B. Audi Pre Sense Front) bereits von einer Handlungsempfehlung an den Fahrer, über

¹ Markus Sieber ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Arbeitswissenschaft der Universität der Bundeswehr München, Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg (e-mail: markus.sieber@unibw.de).

² Marc Schneider ist technischer Angestellter am Institut für Arbeitswissenschaft der Universität der Bundeswehr München, Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg (e-mail: marc.schneider@unibw.de).

³ Andreas Siegel ist Mitarbeiter der Audi Electronics Venture GmbH, 85080 Gaimersheim (e-mail: andreas.siegel@audi.de).

⁴ Dr. Karl-Heinz Siedersberger ist Mitarbeiter der AUDI AG, 85045 Ingolstadt (e-mail: karl-heinz.siedersberger@audi.de).

⁵ Prof. Dr. Berthold Färber ist Leiter des Instituts für Arbeitswissenschaft der Universität der Bundeswehr München, Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg (e-mail: berthold.farber@unibw.de).

Bremsverstärkung bei fahrerinitiiertem Bremsung, bis hin zur fahrzeuginitierten Bremsung zur Mitigation (oder gar vollständigen Vermeidung) einer Kollision im Falle einer ausbleibenden oder unzureichenden Fahrerreaktion. Die assistierte Querführung zur Kollisionsvermeidung ist hingegen nach Forschung von über einem Jahrzehnt (siehe z.B. [3]) bisher nur bei Audi in Serie im öffentlichen Straßenverkehr in Anwendung: So hilft Audi Pre Sense Front dem Fahrer durch unterstützende Lenkmomente, auf einem passenden Pfad am Hindernis vorbeizusteuern. Hierbei muss der Fahrer das Ausweichmanöver zuvor allerdings aus eigenem Antrieb initiieren.

Nicht zuletzt aufgrund hoher Anforderungen, die ein automatisches Ausweichen an die Fahrzeugsensorik und Umfeldwahrnehmung stellt, und der damit einhergehenden Unsicherheit, kommt dem Aspekt der Kontrollierbarkeit [4] von fahrzeuginitierten Eingriffen durch den Fahrer besondere Bedeutung zu. Dabei erweist sich die Gestaltung eines einerseits im Nutzenfall effektiven und gleichzeitig im Fehlerfall für den Fahrer beherrschbaren Systemeingriffs als nicht trivial (siehe z.B. [5]). Es erscheint als zwischengelagerte Evolutionsstufe daher sinnvoll, anstelle vollständig automatisch durchgeführter Ausweichmanöver zunächst nur Warn- und Handlungshinweise an den Fahrer zu übermitteln, der das vorgeschlagene Manöver daraufhin selbstständig einleiten muss. In [6] werden verschiedene Studien zum Ausweichen und Bremsen analysiert, in denen unter anderem festgestellt wurde, dass Fahrer häufig nur mit Bremsen reagieren, auch dann, wenn in der betreffenden Situation ein Ausweichmanöver vorzuziehen wäre. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass eine Verringerung der Fahrerreaktionszeiten um etwa ein Viertel bereits eine starke Steigerung der Erfolgsquote von Ausweichmanövern mit sich brächte. Diese Befunde unterstreichen das Potential einer wirksamen Ausweichempfehlung.

2 Hintergrund und Forschungsfrage

In Bezug auf die Mensch-Maschine-Interaktion eignen sich zur Übermittlung der Handlungsempfehlung manche Sinnesmodalitäten besser als andere. Während es schwer fällt, durch akustische Reize eine zielgerichtete Lenkreaktion hervorzurufen, werden unter anderem Anzeigen zur Übermittlung einer Ausweichempfehlung herangezogen (z.B. [7]), da sie in kurzer Zeit relativ komplexe Information übermitteln können. Visuelle Reize werden allerdings z.B. von Fahrern, deren Blick vom Anzeigort abgewendet ist, nur selten bemerkt. Jedoch gerade für visuell abgelenkte Fahrer, erscheint eine Kollisionswarnung und Ausweichempfehlung relevant.

Hier könnten haptische Reize helfen, die einerseits unabhängig von der Blickrichtung des Fahrers wahrgenommen werden können, und andererseits durch ein Einleiten der erwünschten Fahrer- und Fahrzeugreaktion die Umsetzung der Handlungsempfehlung noch stärker beschleunigen können. Von besonderem Interesse erscheint dabei die Kombination mit einer Teilbremsung. Eine Teilbremsung wird als sinnvolle Ergänzung zur Ausweichempfehlung betrachtet, da sie zum Ersten die etwaige Unfallschwere reduziert falls ein Ausweichmanöver ausbleibt oder erfolglos ist, zum Zweiten den Zeitraum vergrößert, der dem Fahrer zur Reaktion zur Verfügung steht, zum Dritten die

Reifenaufstandskräfte der Vorderräder erhöht und so dynamischere Lenkmanöver erlaubt, und zum Vierten dazu beiträgt, die Aufmerksamkeit des Fahrers auf das Verkehrsgeschehen zu lenken.

Eine haptische Ausweichempfehlung mittels eines gerichteten Lenkmoments wurde zum Beispiel in [8] in einem statischen Simulator untersucht und für wirksam befunden. Der Einfluss der Fahrdynamik auf das Fahrererleben und -verhalten könnte jedoch bei einer Realfahrt zu anderen Ergebnissen führen. Es erscheint daher geboten, den Einfluss eines gerichteten Lenkradmoments als Ausweichempfehlung im Rahmen einer Realfahrt zu untersuchen. Manche Studien (z.B. [9]) berichten den Befund, dass ein systeminitiiertes Lenkradmoment zu einer Festhalte- oder sogar Gegenlenkreaktion der Fahrer führen kann – insbesondere bei gleichzeitiger Bremsung, wenn sich der Fahrer gegen das Trägheitsmoment nach vorne am Lenkrad „abstützt“. Ein weiterer interessanter Untersuchungsgegenstand sind deshalb Ausweichempfehlungen, die über andere Aktoren als das Lenkrad vermittelt werden – beispielsweise über eine einseitige Bremsung.

Bei solchen Untersuchungen sollte jedoch nicht allein der Wirksamkeit derartiger Systemeingriffe betrachtet werden, sondern auch ihre Kontrollierbarkeit sowohl im Nutzen-, als auch im Fehlerfall. In Fahrstudien wurden 4 Szenarien getestet, bei denen unter anderem ein Lenkradmoment und eine einseitige Bremsung als Ausweichempfehlungen beim Notausweichen mit geringem Querversatz zur Anwendung kamen. Die Ausweichempfehlungen wurden dabei von einer automatischen Teilverzögerung begleitet.

3 Methode

3.1 Versuchsgelände, -fahrzeug und -technik

Die Fahrversuche fanden auf dem Testgelände der Universität der Bundeswehr München statt. Als Versuchsfahrzeug diente ein Audi A7 Sportback mit Automatikschaltgetriebe. Die Positionsbestimmung erfolgte mittels einer hochpräzisen Inertialmesseinheit (inertial measurement unit, IMU) in Kombination mit GPS mit Korrekturdaten. Eine nach vorne gerichtete Kamera filmte die Szenerie vor dem Fahrzeug. Zwei weitere Kameras filmten Fahrerportrait und -fußraum und zeichneten die nicht an Fahrzeugdaten ablesbaren Fahrerreaktionen (z.B. Mimik, Bereitschaftshaltung) auf. IMU-Daten wurden mit 100Hz, Fahrzeugdaten mit 50Hz und Kamerabilder mit 25fps erfasst.

Bei jedem Versuch führten die Probanden zunächst eine Reihe einfacher Manöver (vorsichtiges und starkes Beschleunigen, sanftes und heftiges Abbremsen, Geschwindigkeit halten, Wenden, Kurvenfahrten, Fahrten durch eng abgesteckte Tore aus Verkehrsleitkegeln) gegebenenfalls mehrfach aus, bis sie mit dem Beschleunigungs-, Brems- und Lenkverhalten, sowie die Abmessungen des Fahrzeugs vertraut waren.

Zur Darstellung eines plötzlich auftretenden Hindernisses in den Notausweichszenarien wurde CAPLOS (Compressed Air Powered Lateral Obstacle Simulator) verwendet, um ein plötzlich ausparkendes Fahrzeug zu simulieren. Dabei handelt es sich um eine Vorrichtung, die auf ein Funksignal hin über eine pneumatisch angetriebene Schubstange eine Hindernisattrappe seitlich in die Fahrbahn einbringt. Die Attrappe war der

Seitenansicht eines Audi A4 nachempfunden und aufgrund seiner Bauart (Schaumstoff und Styropor mit Fotofolie beklebt, Wegklappmechanismus für den Fall eines Aufpralls) im vorderen Teil auf einer Länge von einem Meter gefahrlos crashbar. Am mechanischen Aufbau von CAPLOS sind Fahrweg und Geschwindigkeitsprofil fest einstellbar, wodurch eine zeitlich und örtlich reliable Positionierung der Attrappe auf der Fahrbahn ermöglicht wurde.



Abbildung 1: CAPLOS im ein- (links) und ausgefahrenen Zustand (rechts) bei Annäherung (aus Szenario B)

3.2 Versuchsszenarien

3.2.1 Szenario A mit freiem und belegtem Gegenfahrstreifen

Szenario A stellte einen potenziellen Nutzenfall für eine Ausweichempfehlung dar. Untersucht wurden Wirksamkeit und Beherrschbarkeit von Ausweichempfehlungen beim Notausweichen mit geringem Querversatz mit nicht abgelenkten Fahrern.

Die Probanden waren instruiert, eine Geschwindigkeit von 50km/h (ohne Verwendung eines Tempomats) zu halten und möglichst in der Mitte ihres Fahrstreifens zu fahren. Sie fuhren entlang einer geraden, landstraßenähnlichen Strecke (je ein Fahrstreifen pro Fahrtrichtung von 3,5m Breite). Über die bekannte Position von CAPLOS (hinter einem quer zur Fahrbahn parkenden Fahrzeug verborgen), die aktuelle Position des Fahrzeugs sowie seine aktuelle Geschwindigkeit wurde laufend die Time-To-Collision (TTC) des Versuchsfahrzeugs zur Zielposition von CAPLOS ermittelt und das Ausfahren der Attrappe per Funksignal so angefordert, dass sie bei einer TTC von 1,2s die Fahrbahngrenze überrollte. In ihrer Endposition blockierte die Attrappe den Fahrstreifen der Probanden auf einer Breite von 1m. Der Gegenfahrstreifen war dabei entweder frei, oder belegt. In letzterem Fall befanden sich 0,5m hinter der Fahrbahnmittenmarkierung (aus Sicherheitsgründen aus Styropor gefertigte) Warnbaken, die eine Ansammlung massiv wirkender Blöcke (aus Sicherheitsgründen Schaumstoffquader) auf dem Gegenfahrstreifen umgrenzten. Vergleiche Abbildung 2.

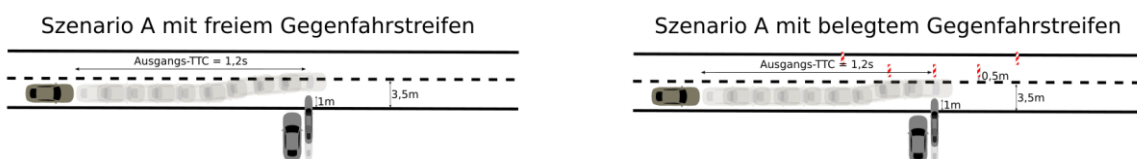


Abbildung 2: Versuchsanordnung für Szenario A mit freiem (links) und belegtem (rechts) Gegenfahrstreifen

Probanden der Kontrollgruppe mussten die Situation ohne Systemunterstützung bewältigen. Bei Probanden der Experimentalgruppen wurde zeitgleich mit dem Eindringen des Hindernisses in die Fahrbahn ein Systemeingriff angefordert. Dieser bestand aus einer automatischen Teilverzögerung (mit 3m/s^2), einer visuellen Anzeige, die zentral vor dem Fahrer in die Windschutzscheibe eingeblendet wurde, sowie einer 0,6s dauernden haptischen Lenkempfehlung, die entweder über ein nach links gerichtetes Drehmoment am Lenkrad (ca. 3Nm), oder ein verstärktes Verzögern der linken Fahrzeugseite (einseitige Bremsung, resultierend in einer Gierrate von etwa $5^\circ/\text{s}$) vermittelt wurde.

Jeder Proband erlebte das Szenario einmal mit freiem und einmal mit belegtem Gegenfahrstreifen. Eine Coverstory garantierte, dass die Probanden unvorbereitet mit dem Notausweichszenario konfrontiert werden konnten. Den Probanden wurde zunächst vorgetäuscht, dass Messfahrten durchgeführt würden, um abzuschätzen, ob die Spurhaltegüte (wobei der Fahrer sich visuell an der Fahrbahnmittenmarkierung orientieren und gleichzeitig möglichst genau eine Geschwindigkeit von 50km/h halten sollte) mit einem linksgelenkten Fahrzeug zwischen Fahrten im Rechts- und Fahrten im Linksverkehr unterschiedlich sei. Die erste Begegnung mit CAPLOS wurde den Probanden als Fehler eines Versuchsleiterkollegen erklärt, der gerade an der Maschine arbeite und sie versehentlich in Betrieb genommen habe. Dieser entschuldigte sich bei den Probanden und bat sie, einen Fragebogen für ihn auszufüllen, um so aus dem Missgeschick noch einen Vorteil zu ziehen. Die Probanden führten im Anschluss einige Fahrten zur Coverstory im Rechts- und im Linksverkehr durch, ehe sie mit Szenario A, diesmal mit geändertem Belegungsstatus des Gegenfahrstreifens, ein zweites Mal konfrontiert wurden.

50 Männer und 10 Frauen im Alter von 21 bis 76 Jahren ($M=30,4$; $SD=11,2$), mit einer Fahrleistung von 3.000 bis 67.000 Kilometern ($M=22.500$; $SD=11.200$) in den vorangegangenen 12 Monaten, nahmen an der Studie teil. Die einzelnen Versuchsgruppen wurden einander bezüglich ihrer Alters- und Fahrleistungsverteilung angeglichen. Die Reihenfolge der Belegung des Gegenfahrstreifens (frei vs. belegt) wurde systematisch ausbalanciert.

3.2.2 Szenario B

Szenario B stellt einen weiteren potenziellen Nutzenfall für eine Ausweichempfehlung dar. Untersucht wurde die Wirksamkeit einer Ausweichempfehlung beim Notausweichen mit geringem Querversatz mit seitlicher Blickabwendung des Fahrers bei Eintreten der kritischen Situation.

Die Probanden waren instruiert, eine Geschwindigkeit von 50km/h (ohne Verwendung eines Tempomats) zu halten. Sie fuhren entlang einer kurvigen Strecke mit je einem Fahrstreifen pro Fahrtrichtung von $3,1\text{m}$ Breite. Dabei waren sie instruiert, kleinbedruckte Schilder am linken Fahrbahnrand laut und deutlich im Vorbeifahren vorzulesen, was in der Regel eine temporäre Blickabwendung von bis zu 90° erforderte. Auf einem geraden Streckenabschnitt stand am rechten Fahrbahnrand hinter einem Sichtschutz das System CAPLOS bereit. Die Anforderung des Hindernisses erfolgte wie unter 3.2.1 beschrieben so, dass die Attrappe bei einer TTC von $1,2\text{s}$ über die Fahrbahngrenze rollte. In ihrer Endposition blockierte sie den Fahrstreifen der Probanden auf einer Breite von $0,6\text{m}$. Der

Gegenfahrstreifen war dabei frei. Siehe Abbildung 3.

Probanden der Kontrollgruppe mussten die Situation ohne Systemunterstützung bewältigen. Bei Probanden der Experimentalgruppen wurde zeitgleich mit dem Eindringen des Hindernisses in die Fahrbahn ein Systemeingriff angefordert. Dieser bestand bei einem Teil der Probanden aus einem vom Fahrzeug automatisch ausgeführten Ausweichmanöver, bei einem anderen Teil aus der Kombination einer automatischen Teilverzögerung (mit 3m/s^2), einer visuellen Anzeige, die zentral vor dem Fahrer in die Windschutzscheibe eingeblendet wurde, sowie einer 0,6s dauernden haptischen Lenkempfehlung in Form eines nach links gerichteten Drehmoments am Lenkrad (ca. 4Nm).

Auch hier wurden die Probanden anhand einer Coverstory unvorbereitet mit dem Notausweichszenario konfrontiert. Den Probanden wurde zunächst vorgetäuscht, die Messfahrten fänden zu dem Zweck statt, herauszufinden, aus welcher Entfernung bestimmte Schriftgrößen bei der Vorbeifahrt mit einer bestimmten Geschwindigkeit lesbar seien.

Ausgewertet wurden nur die Fahrten derjenigen Fahrer, deren Blick bei Anforderung des Hindernisses deutlich nach links abgewandt war. Hierbei handelte es sich um insgesamt 45 männliche und 11 weibliche Probanden im Alter von 19 bis 78 Jahren ($M=27,8$; $SD=12,0$) mit einer Fahrleistung in den vergangenen 12 Monaten von 1.000 bis 100.000 Kilometern ($M=27.710$; $SD=22.774$). Die einzelnen Versuchsgruppen wurden einander bezüglich Alter und Fahrleistung angeglichen.

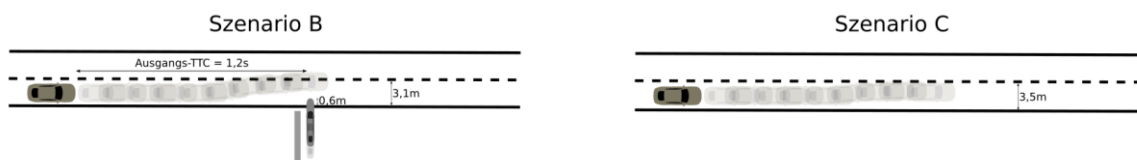


Abbildung 3: Versuchsanordnung für Szenarien B (links) und C (rechts)

3.2.3 Szenario C

Szenario C stellte einen Fehlerfall für eine Ausweichempfehlung dar. Untersucht wurde die Kontrollierbarkeit einer Falschauslösung der Ausweichempfehlung auf freier Strecke und mit nicht abgelenktem Fahrer.

Die Versuchsfahrten zu Szenario C schlossen an die beiden Versuchsfahrten von Szenario A an. Abgesehen von der Anweisung, mit 50km/h (ohne Verwendung eines Tempomaten) zu fahren, hatten die Probanden keine weiteren Instruktionen. Sie fuhren entlang einer geraden, landstraßenähnlichen Strecke (je ein Fahrstreifen je Fahrtrichtung von $3,5\text{m}$ Breite). Siehe Abbildung 3.

Ohne ersichtlichen Grund wurde auf freier Strecke ein Systemeingriff ausgelöst, der sich aus den in 3.2.1 (Szenario A) beschriebenen Komponenten automatische Teilverzögerung, visuelle Anzeige in der Windschutzscheibe, sowie haptische Lenkempfehlung durch Lenkradmoment oder einseitige Bremsung zusammensetzte.

Die Stichprobe war diejenige aus 3.2.1 (Szenario A).

4 Ergebnisse

4.1 Berechtigte Auslösung (Szenarien A und B)

Tabelle 1 zeigt die Häufigkeiten des Bemerkens und der von den Probanden angegebenen Interpretation der haptischen Lenkempfehlungen. In Szenario A (berechtigte Auslösung ohne Blickabwendung) wurden die haptischen Ausweichempfehlungen im Erstkontakt von weniger als der Hälfte der Probanden bewusst wahrgenommen. In Szenario B (berechtigte Auslösung mit seitlicher Blickabwendung) wurde die haptische Ausweichempfehlung immerhin in der Mehrheit der Fälle bewusst wahrgenommen. In beiden Szenarien wurden die Lenkempfehlungen von denjenigen Probanden, die sie bewusst wahrnahmen, jedoch sehr häufig als vom Fahrzeug automatisch durchgeführtes Ausweichen interpretiert.

Tabelle 1: Häufigkeiten zu Bemerkens und zur Interpretation der haptischen Lenkempfehlung bei Erstkontakt

	Nicht bemerkt	Lenkempfehlung / Lenkhilfe	Automatisches Ausweichen	Sonstige Fehldeutung
Szenario A: Lenkradmoment	13 (54%)	4 (17%)	5 (21%)	2 (8%)
Szenario A: Einseitige Bremsung	18 (75%)	3 (13%)	3 (13%)	0 (0%)
Szenario B: Lenkradmoment	3 (30%)	2 (20%)	5 (50%)	0 (0%)

Abbildung 4 zeigt die von den Probanden in den Szenarien A (bei Erstkontakt) und B abgegebenen Urteile auf der Skala zur Bewertung von Fahr- und Verkehrssituationen (SBFV, [10]). Dort wurde das erlebte Fahrscenario im Median jeweils als „gefährlich“ eingestuft (Szenario A: Md=7, 60% der Urteile „gefährlich“ oder „unkontrollierbar“, Szenario B: Md=8, 82% der Urteile „gefährlich“ oder „unkontrollierbar“). In beiden Experimenten führte die Ausweichempfehlung mit Teilbremsung im Empfinden der Probanden nicht zu einer Entschärfung der Situation.

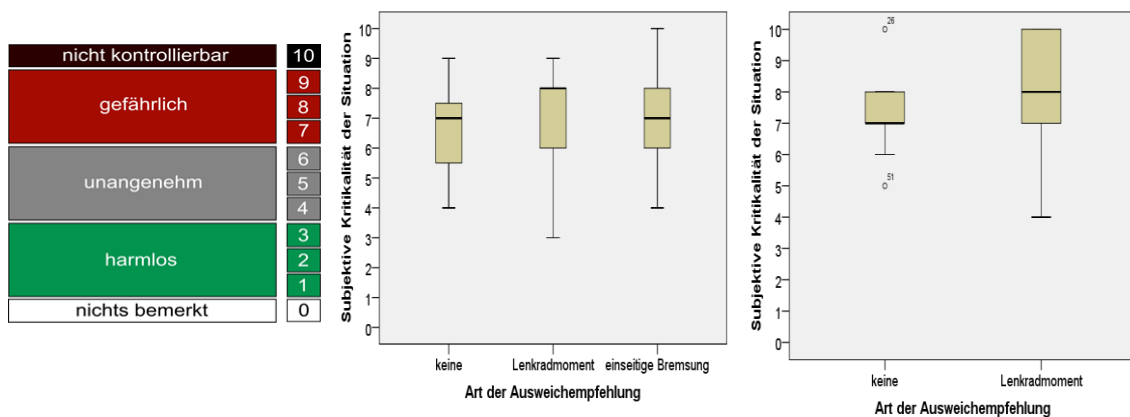


Abbildung 4: SBFV-Skala [10] (links) und -Urteile für Szenario A Erstkontakt (Mitte) & Szenario B (rechts)

In beiden Experimenten zeigte ein sehr hoher Anteil der Fahrer der Kontrollgruppe wenigstens eine minimale Lenkreaktion (und konnte eine Kollision vermeiden). Bei freiem Gegenfahrstreifen in Szenario A und in Szenario B waren es sogar alle Fahrer. Die beobachteten Fahrverläufe mit und ohne Ausweichempfehlung waren kaum zu unterscheiden. In Szenario A waren zwar beispielsweise maximaler Lenkradwinkel und minimale Distanz zum Hindernis mit Ausweichempfehlung durchschnittlich leicht höher als in der Kontrollgruppe, der Effekt allerdings nicht statistisch signifikant. In Szenario B wurde ein seitlicher Sicherheitsabstand von 0,5m zum Hindernis (mit und ohne Ausweichempfehlung in jeweils der Hälfte der Fälle hergestellt) durchschnittlich etwa 1,2m früher hergestellt, auch dieser Unterschied wird aber statistisch nicht signifikant. Auf die Stärke der Bremsreaktion (maximale Längsverzögerung) hatte die Ausweichempfehlung mit Teilbremsung in beiden Experimenten keinen Einfluss. Auf eine Belegung des Gegenfahrstreifens reagierten die Fahrer mit und ohne Ausweichempfehlung angemessen. Ihre Lenkreaktionen fielen im Vergleich deutlich schwächer aus. Es kam zu keiner Kollision mit der Baustellenattrappe. Der hergestellte Querversatz war signifikant geringer als bei freiem Gegenfahrstreifen, $F(1,50)=36,401$; $p<0,001$. Die maximale Längsverzögerung fiel dafür tendenziell (aber statistisch nicht signifikant) höher aus.

4.2 Falschauslösung (Szenario C)

Auf der Skala zur Störungsbewertung [11] wurden nach dem unberechtigten Systemeingriff beim Lenkradmoment 2 von 28 und bei der einseitigen Bremsung 2 von 26 Urteilen im Bereich „gefährlich“ abgegeben. Der in Abbildung 5 dargestellte resultierende maximale Querversatz nach links von der Ausgangsposition bei Falschauslösung war zwischen Lenkradmoment ($M=0,24m$; $SD=0,17m$) und einseitiger Bremsung ($M=0,11m$; $SD=0,07m$) signifikant unterschiedlich, $t(1,58)=3,653$; $p=0,001$. Die unberechtigte Auslösung resultierte in keinem Fall in einem Verlassen des eigenen Fahrstreifens.

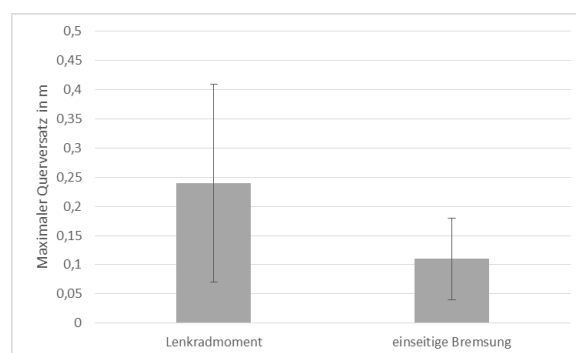


Abbildung 5: In Szenario C hergestellter maximaler Querversatz

Tabelle 2 listet die Häufigkeiten von Bremsreaktionen der Probanden in Szenario C auf. Die Werte zeigen, dass Fahrer als Reaktion auf die Falschauslösung häufig das Bremspedal betätigten und in einzelnen Fällen gar Spitzenverzögerungen von über $7m/s^2$ (als „starke Bremsung“ gewertet) erzeugten.

Tabelle 2: Häufigkeiten zu Bremsreaktionen bei Falschauslösung (Szenario C)

	Nicht mitgebremst	Mitgebremst	Stark mitgebremst
Lenkradmoment	13 (46%)	12 (43%)	3 (11%)
Einseitige Bremsung	6 (23%)	15 (58%)	5 (19%)

5 Diskussion und Ausblick

Die Experimente belegen, dass haptische Lenkempfehlungen wie die hier untersuchten in Kombination mit einer Teilbremsung in Schrecksituationen nicht zuverlässig bewusst wahrgenommen werden. Dies wäre irrelevant, wenn die Ausweichempfehlung sich wirksam zeigt, ohne dass der Fahrer sich dessen bewusst ist. Jedoch wurden die Ausweichempfehlungen, vielleicht aufgrund des geringen benötigten Querversatzes, häufig auch fehlinterpretiert – dahingehend, dass das Fahrzeug das Ausweichmanöver selbstständig ausführe und seitens des Fahrers kein Handlungsbedarf bestehe.

Den haptischen Ausweichempfehlungen in Kombination mit Teilbremsung konnte, obwohl konsistente positive Tendenzen erkennbar waren, in den durchgeführten Experimenten statistisch keine Wirksamkeit belegt werden. Ein Beleg wurde dadurch erschwert, dass im erlebten Szenario auch die Fahrer der Kontrollgruppe ohne Assistenz zuverlässig Lenkbewegungen durchführten. Die im Vergleich zu anderen Studien (siehe z.B. [6]) hohe Lenkhäufigkeit erklärt sich zu einem großen Teil aus dem kleinen benötigten Querversatz und, wie ein Folgeexperiment zeigte (Veröffentlichung in Arbeit), in der schnellen Querbewegung des Zielobjekts. Den größten Beitrag zu den beobachteten positiven Einflüssen der Systemeingriffe lieferte die begleitende Teilbremsung, die beispielsweise bereits bei einem Wirken über 0,9s vor Beginn der Fahrerreaktion die in Szenario B beobachtete örtlich frühere Herstellen des seitlichen Sicherheitsabstandes erklärt. Verlässlicheres und räumlich wie zeitlich signifikant früheres Herstellen des Querabstandes war im untersuchten Szenario nur durch Systemeingriffe zu erreichen, die das Ausweichmanöver vollständig automatisch ausführten (siehe [12]).

Obwohl unklar bleibt, ob Ausweichempfehlungen beim Notausweichen aufgrund der natürlichen Limitationen des Fahrers bei Hindernissen, die sehr plötzlich in geringer zeitlicher Entfernung auftreten, überhaupt wirksam sein können, zeigen die beobachteten Ergebnisse, dass die Systemeingriffe zumindest nicht zum Nachteil reichen – selbst in Situationen, in denen sie gänzlich unangebracht sind (Falschauslösung), oder nicht „blind“ befolgt werden dürfen (wie bei belegtem Gegenfahrstreifen). In letzterem Fall wurde seitens der Fahrer im Vergleich zum freien Gegenfahrstreifen angepasstes Verhalten beobachtet und es wurden keine Sekundärkollisionen registriert. Die Falschauslösung wurde deutlich seltener als die als Kontrollierbarkeitskriterium angesehene Grenze von 15% [13] als „gefährlich“ beurteilt, produzierte keinen objektiv gefährlichen Querversatz und konnte von allen Fahrern in kurzer Zeit ausgeregelt werden. Als potenziell problematisch bei einer unberechtigten Systemauslösung zeigte sich hingegen tendenziell das Längsführungsverhalten der Fahrer, die auf den Eingriff hin teils sehr stark abbremsen und somit möglicherweise nachfolgenden Verkehr unnötig gefährden würden.

Letztere Beobachtung und die eingangs bereits erwähnte These, dass auf das Fahrzeug wirkende Längsverzögerung möglicherweise eine behindernde Wirkung auf eine Lenkreaktion des Fahrers hat, zeigen Forschungsbedarf bezüglich der Interaktion zwischen Teilbremsung und Fahrer auf, um mögliche nachteilige Wirkungen isoliert untersuchen und den vorteilhaften abwägend gegenüber stellen zu können. Weiterer Forschungsbedarf besteht außerdem bezüglich der Wirksamkeit von haptischen Ausweichempfehlungen mit Teilbremsung in anderen Szenarien, beispielsweise bei größerem benötigtem Querversatz oder bei plötzlichen Hindernissen im Längsverkehr, wo die Häufigkeit einer Lenkreaktion unassistierter Fahrer entscheidend geringer scheint und gleichzeitig die Fahrzeugsensorik die Situation zuverlässiger einschätzen kann. Zudem sollte der Einfluss von akustischen Warnsignalen gezielt untersucht werden, die möglicherweise dazu beitragen, dass Fahrer einem Lenkeingriff weniger Widerstand entgegen bringen und stärker mitlenken, vergleiche [12].

Anmerkung

Dieser Beitrag entstand als Kooperation der Universität der Bundeswehr München und der AUDI AG im Rahmen von UR:BAN (Urbaner Raum: Benutzergerechte Assistenzsysteme und Netzmanagement). Das UR:BAN-Projekt wird gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

Literatur

- [1] Verkehrsclub Deutschland, *Es ist Zeit für Vision Zero*. [Online]. <http://www.vcd.org/vision-zero.html>, Abruf am 27.04.2015.
- [2] Statistisches Bundesamt (2011). *Unfallentwicklung auf deutschen Straßen 2010*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt, 2011.
- [3] Kirchner, A., Krüger, K., Mildner, F., & Schmidt, R., "Ein fortgeschrittenes Kollisionsvermeidungssystem," *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift*, Ausgabe 107(1), S. 60-67, 2005.
- [4] Schwarz, J., „Response 3 – Code of Practice for development, validation and market introduction of advanced driver assistance systems,” *VDI-Berichte*, Ausgabe 1960, S. 465-472, Düsseldorf: VDI-Verlag, 2006.
- [5] Heesen, M. et al., "Interaction design of automatic steering for collision avoidance: challenges and potentials of driver decoupling," *IET Intelligent Transport Systems*, Ausgabe 9(1), S. 95-104, 2015.
- [6] Adams, L.D., "Review of Literature on Obstacle Avoidance Maneuvers: Braking versus Steering," *Report No. UMTRI-94-19*, Ann Arbor, August 1994.
- [7] Weber, D., "Untersuchung des Potenzials einer Brems-Ausweich-Assistenz," *Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik*, Ausgabe 13, Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2012.

- [8] Kleen, A. & Schmidt, G., „Haptische Ausweichempfehlungen in Kollisionssituationen: Effektivität und Aspekte der Kontrollierbarkeit,“ undatiert. [Online]. <https://www.tu-berlin.de/fileadmin/f25/dokumente/8BWMMS/3.2-Kleen.pdf>, Abruf am 27.04.2015.
- [9] Hesse, T., Schieben, A., Heesen, M., Dziennus, M., Griesche, S. & Köster, F., “Interaction Design for Automation Initiated Steering Manoeuvres for Collision Avoidance,” *6. Tagung Fahrerassistenzsysteme*, 2013. [Online]. <http://mediatum.ub.tum.de/doc/1187194/1187194.pdf>, Abruf am 23.04.2015.
- [10] Neukum, A., Lübbecke, T., Krüger, H.-P., Mayser, C. & Steinle, J., „ACC-Stop&Go: Fahrerverhalten an funktionalen Systemgrenzen,“ in: Maurer, M. & Stiller, C. (Hrsg.), *5. Workshop Fahrerassistenzsysteme – FAS 2008*, S. 141-150, 2008.
- [11] Neukum, A. & Krüger, H.-P., „Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen – Untersuchungsmethoden und Bewertungskriterien“, *VDI-Berichte*, 1791, S. 297-318, 2003.
- [12] Sieber, M., Siedersberger, K.-H., Siegel, A. & Färber, B., „Automatic Emergency Steering with Distracted Drivers: Effects of Intervention Design,“ *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, Las Palmas de Gran Canaria, September 2015. [accepted]
- [13] Neukum, A., Ufer, E., Pauling, J., Krüger, H.-P., “Controllability of superposition steering system failures,” *steering.tech*, München, März/April 2008.