

# Kontrollierbarkeitsbewertung von FAS der aktiven Sicherheit in frühen Phasen des Entwicklungsprozesses mit dem Vehicle in the Loop (VIL)

Fabian Rüger<sup>1</sup>, Markus Sieber<sup>1</sup>, Andreas Siegel<sup>2</sup>,  
Karl-Heinz Siedersberger<sup>3</sup> und Berthold Färber<sup>4</sup>

**Kurzfassung:** Im Bereich der aktiven Sicherheit werden in Förderprojekten wie UR:BAN (Lehsing et al. 2013) Fahrerassistenzsysteme entwickelt, die bestehende Notbremssysteme um Eingriffe in die Querführung (Kollisionsvermeidung durch Ausweichen und Bremsen, KAB) erweitern. Parallel zum Entwicklungsprozess müssen Methoden für die Bewertung der Kontrollierbarkeit solcher Systeme bereitgestellt werden. Mit dem VIL existiert eine Prüfumgebung im Schnittfeld von Realfahrzeug und Simulation, die neue methodische Zugänge für Beherrschbarkeitsfragen liefert (Berg und Färber 2015). In diesem Beitrag werden exemplarisch Fragen zur Kontrollierbarkeit der KAB-Systeme aufgegriffen und mit der VIL-Methode evaluiert.

## 1 Aktive Sicherheit im UR:BANen Verkehr

Das Potential von passiven Sicherheitsmaßnahmen, z.B. durch konstruktive Möglichkeiten oder Sicherheitsgurte, ist in modernen Personenkraftwagen nahezu erschöpft (Kompass et al. 2012). Eine weitere Senkung der Unfallzahlen, um z.B. Ziele wie "Vision Zero" (Vision Zero Initiative 2011) zumindest in Industrienationen erreichen zu können, erfordert eine Kombination mit Systemen der aktiven Sicherheit (Kompass et al. 2012). Unter diesem Aspekt lag der Schwerpunkt des Förderprojekts AKTIV AGB auf der Erforschung von Frontalkollisionsschutzsystemen mit aktivem Bremseneingriff (vgl. AKTIV 2011). Im Rahmen des Nachfolgeprojekts UR:BAN KAB (vgl. Lehsing et al. 2013) soll das Unfallvermeidungspotential solcher Systeme durch zusätzliche Eingriffe in die Querführung weiter erhöht werden. Systeme zur Kollisionsvermeidung durch Ausweichen und Bremsen (KAB) ermöglichen speziell bei kleinen Kollisionsüberdeckungen oder hohen Differenzgeschwindigkeiten zu Kollisionsobjekten (z.B. bei stehenden Hindernissen) eine Vermeidung von Unfällen zu späteren Eingriffszeitpunkten, an denen ein erfolgreiches Bremsmanöver bereits physikalisch unmöglich ist (Dang et al. 2012).

---

<sup>1</sup> Fabian Rüger und Markus Sieber sind wissenschaftliche Mitarbeiter am Institut für Arbeitswissenschaft, Universität der Bundeswehr München (fabian.rueger@unibw.de, markus.sieber@unibw.de).

<sup>2</sup> Andreas Siegel ist Mitarbeiter der Audi Electronics Venture (AEV), Ingolstadt (andreas.siegel@audi.de).

<sup>3</sup> Karl-Heinz Siedersberger ist postgraduierter Mitarbeiter der AUDI AG, Ingolstadt (karl-heinz.siedersberger@audi.de)

<sup>4</sup> Berthold Färber ist Universitätsprofessor und Leiter des Instituts für Arbeitswissenschaft der Universität der Bundeswehr München (berthold.farber@unibw.de).

## 2 Absicherung von FAS der aktiven Sicherheit

FAS der aktiven Sicherheit greifen in kollisionsnahen Situationen massiv in die Fahrzeugführung ein, um drohende Unfälle zu vermeiden oder abzumildern. Solche FAS, die von Gasser et al. (2015) als "eingreifende Notfallsysteme" bezeichnet werden, nehmen nicht nur juristisch eine Sonderstellung ein, sondern bedürfen auch spezieller Absicherungsstrategien vor Serienzulassung. Die funktionale Sicherheit behandelt dabei elektrische bzw. elektronische Fehler (e/e-Fehler), die zu ausbleibenden oder ungewollten Eingriffen führen können (ISO 26262 2011). Ungewollte Auslösungen, die auch als Falsch- oder nicht-situationsadäquate Auslösungen bezeichnet werden, können aber auch andere Ursachen haben. Zum Beispiel können Sensordaten innerhalb der funktionalen Spezifikation fehlerhaft interpretiert werden. Für den Fahrer, als Träger der Konsequenzen, ist die Ursache einer Falschauslösung irrelevant, weshalb Ebel et al. (2010) eine ganzheitliche Betrachtung dieser Fälle mit Absicherung in Anlehnung an die ISO 26262 vorschlagen. Speziell bei Notfallsystemen, die aufgrund der Besonderheit der Situation und der Intensität des Eingriffs potentiell wenig zielgerichtete Fahrerreaktionen hervorrufen können, ist neben Falschauslösungen auch die Gebrauchssicherheit im Nutzenfall zu adressieren (vgl. Färber 2015).

Aus den Anforderungen der ISO-Norm bedingt, als auch zur Gewährleistung der Gebrauchssicherheit, muss die Kontrollierbarkeit von FAS durch den Fahrer bewertet werden. Speziell in Anbetracht der in der Einleitung vorgestellten KAB-Funktionen ergeben sich hieraus besondere Anforderungen an die Evaluationsmethodik. In den Richtlinien des "RESPONSE Code of Practice" (RESPONSE Consortium 2009) wird gefordert, dass parallel zum Entwicklungsprozess von FAS valide Methoden bereit gestellt und etabliert werden müssen, mit denen auch der finale Nachweis der Beherrschbarkeit durch den Fahrer vor Markteinführung erbracht werden kann. Analog zu Frontalkollisionsschutzsystemen mit harten Bremsengriffen (vgl. Fecher et al. 2008) soll in diesem Beitrag eine Methodik aufgezeigt werden, die zur Evaluation von Kontrollierbarkeitsfragen der KAB-Systeme entwickelt wurde.

## 3 Kontrollierbarkeitsbewertung mit der "VIL-Methode"

Ein zentraler Bestandteil der Evaluationsmethodik ist die Wahl der Prüfumgebung. Im Realfahrzeug sind vor allem Sicherheitsaspekte die limitierenden Faktoren für die Gestaltung von Experimenten. Simulationsumgebungen, die solche Einschränkungen nicht besitzen, können die realen Gegebenheiten oft nur ungenügend abbilden, weshalb sich Fragen der Validität stellen. Das VIL ist ein Ansatz im Schnittpunkt von Realfahrzeug und Simulation, bei dem der Fahrer über ein Head-Mounted-Display eine virtuelle Welt angezeigt bekommt während er ein echtes Fahrzeug auf einer Teststrecke bewegt (vgl. Berg und Färber 2015). Dadurch ist sichergestellt, dass die Wirkung von FAS auf den Fahrer, z.B. durch haptische oder vestibuläre Reize, real bleibt, während der Kontext der Fahrsituation in der Simulation beliebig angepasst werden kann. Das Fahrerverhalten im VIL wurde in Rüter et al. (2014) und Purucker et al. (2014) in ausgewählten Grundlagenmanövern mit Fahrerverhalten im Realfahrzeug verglichen. Es zeigte sich unter anderem, dass Fahrsituationen im VIL subjektiv leicht kritischer beurteilt werden und Reaktionszeiten der Fahrer geringfügig länger sind. Die gefundenen Unterschiede lassen Urteile und Versuchsergebnisse im VIL tendenziell konservativer ausfallen. Global kann das Fahrerverhalten im VIL als vergleichbar zum Realfahrzeug beschrieben werden (Rüter et al. 2014).

Unter Berücksichtigung dieser Befunde wurde mit dem VIL in einer mehrstufigen Versuchsreihe die Beherrschbarkeit von KAB-Systemen evaluiert. Das methodische Vorgehen wird hier ausführlich dargestellt und die wichtigsten Ergebnisse überblicksartig zusammengefasst.

### 3.1 Ableiten von Testfällen

Im Rahmen der Absicherung von FAS wird eine systematische Identifikation möglicher Gefahren und Risiken durchgeführt. Für KAB-Systeme stellt die darin ermittelte Gefahr eines Zusammenstoßes mit entgegenkommenden Fahrzeugen, aufgrund der großen Schadensschwere, ein abzusicherndes Risiko für Nutzenfall (vgl. Abbildung 1, links) wie Falschauslösungen dar (vgl. Abbildung 1, rechts).

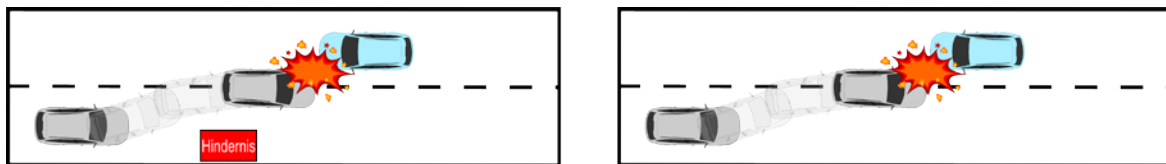


Abbildung 1: Gefahr der Kollision mit entgegenkommenden Fahrzeugen

In Weitzel (2013) wird ein Verfahren vorgestellt, bei dem die Relevanz einzelner Parameter der Kategorien Fahrer, Fahrzeug und Umwelt für eine Kontrollierbarkeitsuntersuchung analysiert wird. Aus gefundenen Einflussfaktoren können relevante Testfälle zur Untersuchung von Kontrollierbarkeitsfragen generiert werden. In Anlehnung an dieses Verfahren wurden für KAB-Systeme Testfälle abgeleitet, die in Tabelle 1 aufgeführt sind. Zu beachten ist, dass in frühen Phasen des Entwicklungsprozesses noch Änderungen an der FAS-Funktion zu erwarten sind. Deshalb zielen die Testfälle auf die Gewinnung allgemeiner Aussagen ab, die funktionsübergreifend Gültigkeit besitzen sollen.

Tabelle 1: Testfälle zur Kontrollierbarkeitsbewertung von KAB-Systemen

Skizze:	Beschreibung/Fragestellung:
<p>Testfall 1:</p>	<p>Ausweichassistenzsystem greift im entgegenkommendem Fahrzeug ein.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Wo liegen die Grenzen der Beherrschbarkeit für andere Verkehrsteilnehmer (Ego)?</li> <li>2. Werden Schreckreaktionen beim Ego-Fahrer beobachtet?</li> </ol>
<p>Testfall 2:</p>	<p>Fahrer erlebt berechtigten Eingriff eines Ausweichassistenzsystems.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Wie reagiert der Fahrer?</li> <li>2. Welchen Einfluss hat ein belegter Gegenfahrstreifen auf die Fahrerreaktion?</li> <li>3. Werden Schreckreaktionen beobachtet?</li> </ol>

### 3.2 Testfall 1: Kontrollierbarkeit aus Sicht anderer Verkehrsteilnehmer

Im Sinne des RESPONSE Code of Practice (CoP) können Gegenmaßnahmen zur Abwendung von Gefahren nicht nur vom Fahrer selbst, sondern auch von anderen Verkehrsteilnehmern eingeleitet werden. Eine Betrachtung der Kontrollierbarkeit von FAS aus diesem Blickwinkel kann vor allem bei FAS der aktiven Sicherheit sinnvoll sein, deren Eingriffe bei möglichen Falschauslösungen durch den Fahrer selbst nicht vollständig kompensiert werden können. Fach et al. (2010) und Neukum et al. (2014) untersuchten beispielsweise Eingriffe von Notbremssystemen aus Sicht des Folgeverkehrs und ermittelten eine Grenze der Beherrschbarkeit. Durch die Kenntnis der Fahrerleistungen des Folgeverkehrs bei solchen Eingriffen ist eine effizientere und gleichzeitig beherrschbare Auslegung von Notbremssystemen möglich. Das gilt vor allem auch für den Fall, dass der Fahrer selbst eine Falschauslösung bei kurzzeitigen Eingriffen mit hoher Dynamik nicht übersteuern kann.

Die Erweiterung der Notbremssysteme um Eingriffe in die Querführung bedeutet gleichzeitig, dass nicht nur Folgeverkehr, sondern auch Verkehrsteilnehmer auf dem Gegenfahrstreifen als mögliche Konfliktpartner berücksichtigt werden müssen. Um auch hier belastbare Aussagen über die Grenzen der Kontrollierbarkeit aus Sicht anderer Verkehrsteilnehmer zu erhalten, wird ein Untersuchungsansatz gewählt, in dem Fahrer Auslösungen von Ausweich-Funktionen in entgegenkommenden Fahrzeugen erleben. Es soll dadurch, analog zu Notbremssystemen, eine feste Grenze ermittelt werden, innerhalb derer ein Normalfahrer in der Lage ist, Ausweichbewegungen entgegenkommender Fahrzeuge durch geeignete Gegenmaßnahmen zu kompensieren. Das kann z.B. ein Verzögerungsmanöver oder das Steuern des Fahrzeugs an den rechten Fahrstreifenrand sein.

#### 3.2.1 Methode

In einem Expertengremium aus Ingenieuren und Human-Factors-Spezialisten wurden zunächst Parameter identifiziert, die relevant für die äußere Wahrnehmung von Ausweich-Funktionen sind. Diese Parameter wurden in Vorversuchen auf vier Sets eingegrenzt (siehe Abbildung 1), die als Basis zur Ermittlung der Beherrschbarkeits-Grenze herangezogen werden sollten. Ausgehend von einer Fahrstreifenbreite von 3.5 m und einer innerorts üblichen Geschwindigkeit von 50 km/h sollte einerseits eine Reaktion des Ego-Fahrers erforderlich, andererseits auch im Rahmen normaler Fahrerleistungen möglich sein. Ausweichmanöver innerhalb des eigenen Fahrstreifens zeigten sich in den Vorversuchen bei jeder Parameterkombination als leicht beherrschbar und die maximale Querschleunigung als wenig relevant für die Wahrnehmung des Manövers durch entgegenkommende Fahrzeuge.

Set	$\Delta s$	$\Delta i$	$\Delta t$	$a_{max}$
1	2.0 m	1.25 m	1.0 s	7.5 m/s <sup>2</sup>
2	1.5 m	0.75 m	1.0 s	7.5 m/s <sup>2</sup>
3	2.0 m	1.25 m	2.0 s	7.5 m/s <sup>2</sup>
4	1.5 m	0.75 m	2.0 s	7.5 m/s <sup>2</sup>

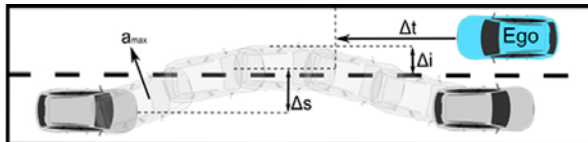


Abbildung 2: Untersuchte Parametersets für Ausweichtrajektorien

Aus den Parametersätzen wurden anhand der Formeln in Winner (2012, S. 530) Trajektorien berechnet, in der virtuellen Welt implementiert und mit 48 Probanden in drei verschiedenen urbanen Verkehrsszenarien untersucht. In Fahrsituation 1 musste ein Rechtsabbieger scharf bremsen, worauf im nachfolgenden, roten Fahrzeug ein Ausweichassistenzsystem eingriff (vgl. Abbildung 3, links). In der zweiten Situation stellte ein plötzlich auf die Straße laufendes Kind den Grund für den FAS-Eingriff dar (Abbildung 3, Mitte), während in der dritten Situation eine typische Falschauslösung untersucht wurde (vgl. Abbildung 3, rechts). In allen Fahrsituationen wurde der rechte Fahrstreifenrand durch ein parkendes bzw. haltendes Fahrzeug begrenzt.



**Abbildung 3: Testfall 1 – Fahrsituationen „Abbieger“(links), „Kind“(Mitte) und „Falschauslösung“(rechts)**

Jeder Proband erlebte Ausweichmanöver mit demselben Parametersatz in allen drei Fahrsituationen. Zur Verschleierung wurde eine Coverstory verwendet und „Dummy“-Situations zwischen die Ausweichsituationen geschoben. Den Probanden wurde erzählt, der Untersuchungszweck sei ein Vergleich von Tempomat-Interaktionen zwischen VIL und Realfahrzeug. Sie würden verschiedene Fahrsituationen erleben, die eine andere Gruppe so im Realverkehr durchfahren hätte. Entsprechend wurden die Fahrer nach jeder Situation auch zum Umgang mit dem Tempomat im VIL befragt. Erst nach der letzten Ausweichsituation wurden Sie über den eigentlichen Zweck der Studie aufgeklärt. Zur Ermittlung der Beherrschbarkeitsgrenze wurden Pass-/Fail-Kriterien erstellt. Eine Situation galt als kontrollierbar, wenn keine Kollision verzeichnet wurde. Durch die Randbedingungen des Szenarios wäre auch beim Verlassen des Fahrstreifens eine Kollision detektiert worden. Weiterhin sollten die Subjektivurteile der Fahrer anhand der Skala zur Bewertung von Fahr- und Verkehrssituationen (SBFV-Skala, Neukum et al. 2008) als Kriterium herangezogen werden. Analog zur Vorgehensweise bei fehlerhaften Lenkmomenten in Neukum et al. (2008) galt eine Bedingung bei mehr als 15% Urteilen im Bereich „gefährlich“ als nicht kontrollierbar. Unterhalb dieser Grenze wurden „gefährlich“-Urteile in einem sequentiellen Verfahren mit den dazugehörigen Objektiv-Messwerten abgeglichen, um die Reliabilität des Subjektivurteils zu überprüfen. Erwies sich ein „gefährlich“-Urteil als berechtigt, galt die Bedingung als nicht kontrollierbar.

### 3.2.2 Ergebnisse

Nach einem erlebten Ausweichmanöver wurden die Fahrer nach ihrer Einschätzung der Kritikalität der Fahrsituation befragt. Ein Urteil im Bereich „gefährlich“ (SBFV-Skala: 7-9) sollten sie nur abgeben, wenn sie der Meinung waren, eine solche Fahrsituation wäre im realen Straßenverkehr nicht tolerierbar. Sowohl zwischen den Parameter-Sets als auch zwischen den untersuchten Fahrsituationen zeigten sich deutliche Unterschiede (vgl. Abbildung 4).

Bei Parameter Set 1 waren 28 von 36 Urteilen (78%) im „gefährlich“-Bereich, bei Set 2 elf (31%), bei Set 3 sechs (17%), und nur drei (8%) bei Set 4. Von diesen „gefährlich“-Urteilen verteilten sich jeweils zehn auf die Fahrsituationen „Rechtsabbieger“ und „Falschauslösung“ (ca. 21%). In der Situation „Kind“, waren sogar 58% aller Ratings im „gefährlich“-Sektor (28 von 48).

Die subjektive Wahrnehmung der Fahrer zeigt eine große Übereinstimmung mit den objektiven Daten. Wie in Abbildung 4 rechts zu sehen, konnten bei den Parameter Sets 1 und 2 nicht alle Fahrer eine Kollision verhindern. Vor allem die Fahrsituation „Kind“ brachte deutlich mehr Kollisionen hervor.

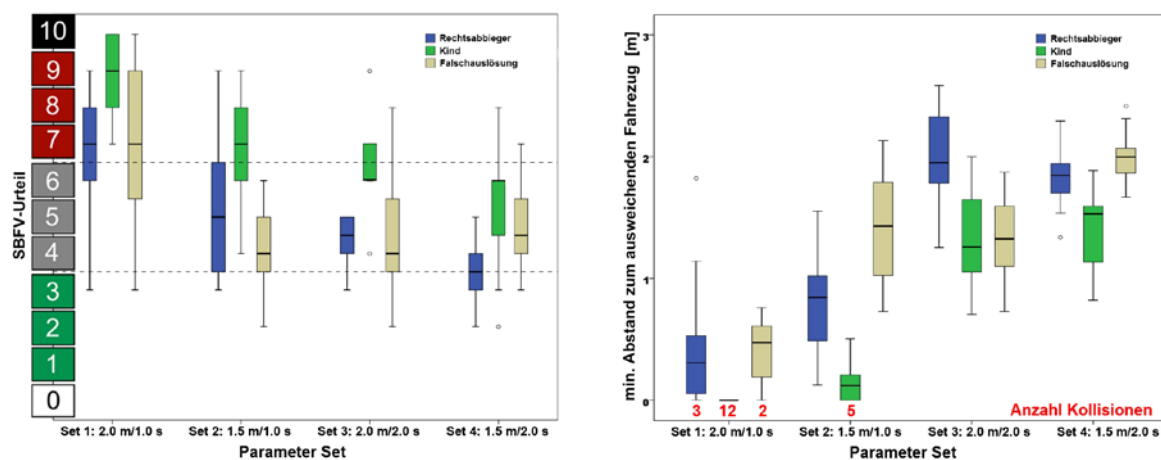


Abbildung 4: Subjektivurteile (links) und minimaler Abstand zum ausweichenden Fahrzeug (rechts)

### 3.2.3 Interpretation der Ergebnisse

Testfall 1 untersuchte systematisch parametrisierte Ausweich-Assistenzfunktionen aus Sicht des Gegenverkehrs in unterschiedlichem situativem Kontext. Bei der Betrachtung der drei untersuchten Fahrsituationen fällt auf, dass besonders bei der Situation „Kind“ viele Kollisionen und kritische Subjektivurteile zu finden waren. In der Befragung zur Fahrsituation gaben fast alle Probanden bei dieser Situation an, dass sie zunächst den Fußgänger am rechten Fahrbahnrand beobachteten, der sich aus einem Haus Richtung Fahrbahn bewegte, bevor er seinen Weg entlang des Bürgersteigs fortsetzte (vgl. Abbildung 3, Mitte). Durch diese visuelle Ablenkung, unmittelbar vor dem Ausweichszenario, reagierten die Fahrer bei der Situation „Kind“ im Mittel 0.3 s später als bei den anderen Fahrsituationen, wodurch die verschärfte Kritikalität des Szenarios erklärt wird. Durch die nicht kontrollierte Ablenkung müssen die Ergebnisse der Fahrsituation „Kind“ deshalb für die Anwendung der Fail-Kriterien ausgeschlossen werden, da bei deren Festlegung von einem aufmerksamen Fahrer ausgegangen wurde.

Die Situationen „Rechtsabbieger“ und „Falschauslösung“ brachten sehr ähnliche Ergebnisse hervor, die aber durch verschiedene Verhaltensmuster zu Stande kamen. Während bei „Rechtsabbieger“ die Mehrzahl der Fahrer an den rechten Fahrstreifenrand steuerte um dem ausweichenden Fahrzeug den nötigen Platz zu lassen, leiteten die Fahrer bei der Situation „Falschauslösung“ fast immer eine Vollbremsung ein. Diese These der unterschiedlichen Verhaltensmuster wird durch Angaben in der Befragung der Fahrer gestützt. Das Ausweichmanöver aufgrund des verzögernden Rechtsabbiegers nahmen viele Fahrer als rücksichtsloses Überholmanöver wahr, weshalb manche Fahrer während des Versuches auch die Hupe betätigten. Bei der Falschauslösung vermuteten viele Fahrer es habe sich um einen "Geisterfahrer" gehandelt. Durch diese unterschiedliche Wahrnehmung konnten sie bei der Situation „Rechtsabbieger“ davon ausgehen, dass das Fahrzeug zügig in den eigenen Fahrstreifen zurücklenkt, bei der Situation „Falschauslösung“ nicht. Entsprechend lösten sie die Situationen vermehrt mit Lenken oder einer Vollbremsung.

Bei den Parametersätzen erwiesen sich Set 1 und 2, mit einer Zeitlücke von jeweils 1 s zum entgegenkommenden Fahrzeug, als nicht beherrschbar. Sowohl die Subjektivurteile als auch die detektierten Kollisionen führen zu diesem Urteil. Bei allen Funktionen mit einer Zeitlücke von 2 s konnten die entgegenkommenden Fahrer durch Brems- und/oder Lenkmanöver eine Kollision mit dem ausweichenden Fahrzeug vermeiden. Alle „gefährlich“-Urteile bei den Parameter Sets 3 und 4

wurden in der Situation „Kind“ abgegeben, die für die Kontrollierbarkeitsbewertung ausgeschlossen wurde. Deshalb können die Parameter-Sets 3 und 4 als beherrschbar bezeichnet werden.

### 3.3 Testfall 2: Kontrollierbarkeit von KAB-Auslösungen im Nutzenfall

Mit Testfall 1 wurden die Randbedingungen für eine KAB-Auslösung gesteckt, die Idealtrajektorien ohne zusätzlicher Interaktion zwischen System und Fahrer verwendeten. Eine Interaktion mit dem Fahrer bietet aber zusätzliches Potential hinsichtlich der Beherrschbarkeit der Systeme. In Untersuchungen von Pütz et al. (2014) und Heesen et al. (2015) wurde bei Ausweich-Systemen mit nicht entkoppelter Lenkung der Fahrer als stark dämpfendes Element in der Regelkette beschrieben. In Testfall 2 soll untersucht werden, ob ein Fahrer in der Lage ist, berechnete Eingriffe in die Querführung situationsadäquat zu dämpfen, wenn der Gegenfahrstreifen belegt ist.

#### 3.3.1 Methode

Die Fragestellung wurde in einem Querverkehrsszenario bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von 50 km/h und einer Fahrstreifenbreite von 3.5 m untersucht. Ein Fahrzeug parkte bei einer TTC von 1.6 s seitlich hinter einer Verdeckung aus und ragte final 1 m in den Fahrstreifen (vgl. Abbildung 5).



Abbildung 5: Querverkehrsszenario mit freiem (links), belegtem Gegenfahrstreifen (Mitte) und im VIL (rechts)

Bei einer TTC von 1.2 s griff ein automatisches Ausweichsystem ein, das das Fahrzeug auf einer Idealtrajektorie mit einem Meter Querversatz um das Hindernis lenken sollte. Jeweils bei der Hälfte der Probanden war der gegenüberliegende Fahrstreifen auf Höhe des Hindernisses belegt, bei der anderen Hälfte frei (vgl. Abbildung 5). Da Fahrerverhalten bei derartigen Eingriffen zuvor im VIL noch nicht evaluiert wurde, sollten die Ergebnisse im Rahmen der Methodvalidierung durch etablierte Verfahren gestützt und bestätigt werden. Dazu erlebte jeder Proband die Fahrt sowohl im VIL als auch auf der Teststrecke. Als Querverkehr diente dort ein seitliches Hindernis in Form einer crashbaren, fotorealistischen Fahrzeugsilhouette, die pneumatisch in die Fahrbahn befördert werden konnte (vgl. Abbildung 5). 24 Versuchspersonen durchführten so jeweils ein Ausweich-Szenario im Realfahrzeug auf der Teststrecke und im VIL in systematisch variiert Reihenfolge. Zur Verschleierung der Eingriffe wurde eine Coverstory verwendet. Danach war das Ziel der Studie ein Vergleich von Engstellenfahrten zwischen VIL und Realfahrzeug. Die jeweils erste Ausweich-Situation wurde als Test für eine Folgestudie deklariert.

#### 3.3.2 Ergebnisse

Die Eingriffe der Ausweichfunktion zielten fest auf einen Meter Querversatz, unabhängig von der lateralen Ausgangsposition. Bei der instruierten mittigen Fahrweise wäre es ohne Eingriff des Fahrers zu einer Überschreitung des eigenen Fahrstreifens von ca. 0.25 m gekommen. Wie in

Abbildung 6 links zu sehen, dämpften die Fahrer den Eingriff bei belegtem Gegenfahrstreifen auf ca. 0.5 m Querversatz. Bei freiem Gegenfahrstreifen wurde bei den meisten Fahrern ein Querversatz zwischen 0.8 und 1.5 m gemessen. Keiner der Fahrer kollidierte mit dem Querverkehr oder dem Hindernis auf dem Gegenfahrstreifen.

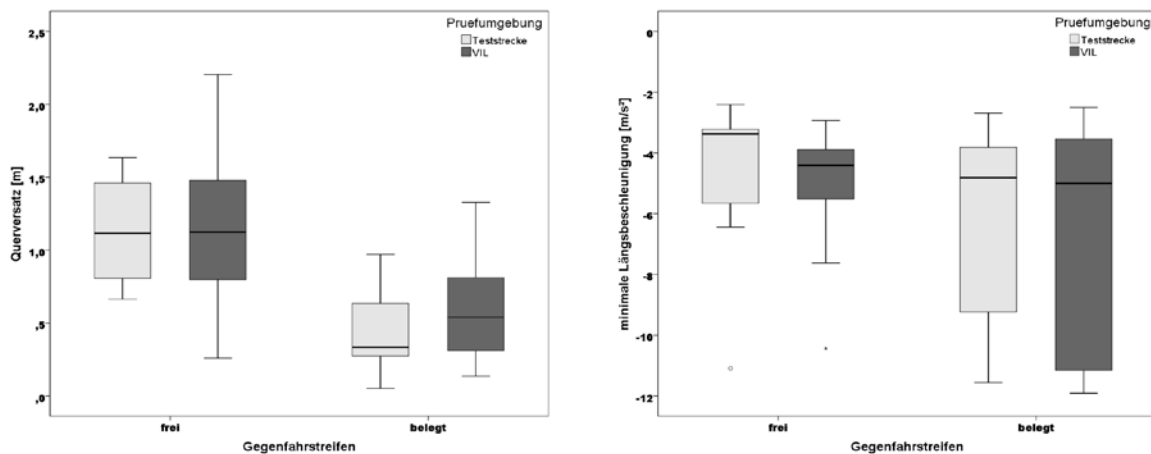


Abbildung 6: Querversatz (links) und minimale Längsbeschleunigung (rechts)

Während des Systemeingriffs betätigten alle Fahrer die Betriebsbremse. Bei freiem Gegenfahrstreifen waren die gemessenen minimalen Längsbeschleunigungen im Mittel bei ca.  $-4 \text{ m/s}^2$ , bei belegtem Gegenfahrstreifen verzögerten manche Fahrer mit Intensitäten unter  $-10 \text{ m/s}^2$  (siehe Abbildung 6 rechts). Durch die Querbeschleunigung und die Gierrate kann die Dynamik des Ausweichmanövers beschrieben werden. Bei belegtem Gegenfahrstreifen waren die maximalen Beträge beider Variablen wesentlich geringer als bei freiem Gegenfahrstreifen (vgl. Abbildung 7).

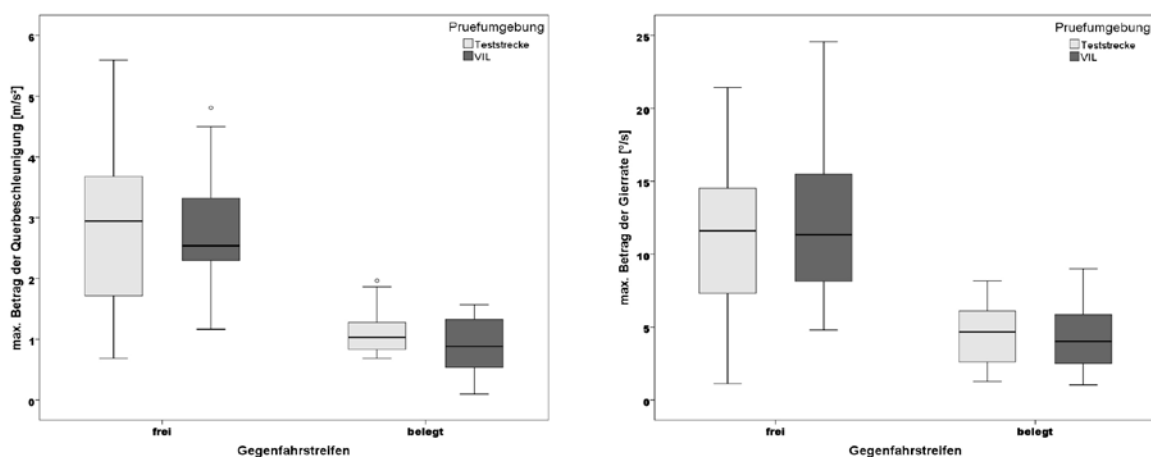


Abbildung 7: maximale Beträge der Querbeschleunigung (links) und der Gierrate (rechts)

Wie bereits in Abbildung 6 und Abbildung 7 zu erkennen, unterscheiden sich die gemessenen Werte zwischen den Prüfungen Teststrecke und VIL kaum. Um den vermuteten Zusammenhang der Messwerte zwischen VIL und Realfahrzeug auch statistisch zu belegen, wurden Korrelationskoeffizienten nach Pearson berechnet. Für die Variablen Querversatz ( $r = .589$ ,  $p = .002$ ), min. Längsbeschleunigung ( $r = .709$ ,  $p < .001$ ), max. Querbeschleunigung ( $r = .772$ ,



$p < .001$ ) und max. Gierrate ( $r = .656, p = .001$ ) konnten signifikante Zusammenhänge festgestellt werden.

### 3.3.3 Interpretation der Ergebnisse

Sowohl bei den vorgestellten Variablen, als auch bei Betrachtung der Signalverläufe, konnten große Unterschiede in der Interaktion von Fahrern mit einem Ausweichassistenzsystem, abhängig von der Belegung des Gegenfahrstreifens, beobachtet werden. Nach einer kurzen Phase von ca. 400 ms, in der fast alle Fahrer dem System reflexartig entgegenwirkten, griffen die meisten Probanden die systeminitiierte Ausweichbewegung bei freiem Gegenfahrstreifen auf und lenkten in Einklang mit der Funktion um das Hindernis. Dabei wurde die Zielvorgabe von einem Meter Querversatz teilweise überschritten. Bei belegtem Gegenfahrstreifen dämpften sie den Systemeingriff situationsadäquat, so dass sowohl eine Kollision mit dem Querverkehr als auch mit dem Hindernis auf dem Gegenfahrstreifen vermieden wurde. Die Fahrer konnten auch in einer überraschenden und kritischen Fahrsituation als Rückfallebene agieren, was eine wichtige Erkenntnis über die Beherrschbarkeit von Systemen mit Ausweichkomponente im Hinblick auf mögliche Serienzulassungen liefert. Diese Ergebnisse zeigten sich sowohl im VIL als auch im Realfahrzeug auf der Teststrecke. Durch signifikante Zusammenhänge der Messwerte zwischen beiden Prüfumgebungen kann das VIL als valides Werkzeug für die Evaluation von Kontrollierbarkeitsfragen für KAB-Systeme angesehen werden.

## 4 Fazit und Ausblick

Mit der „VIL-Methode“ wurden im vorliegenden Beitrag Fragen zur Kontrollierbarkeit von KAB-Systemen in einem frühen Stadium der Entwicklung evaluiert. Der Fokus lag hierbei auf der Komponente "Ausweichen", da zu Bremsingriffen schon zahlreiche Befunde vorliegen. Mit dem VIL konnten Grenzen der Beherrschbarkeit aus Sicht anderer Verkehrsteilnehmer aufgezeigt werden, die bei der Gestaltung von Ausweich-Funktionen berücksichtigt werden sollten. Es zeigte sich, dass aufmerksame Fahrer durch geeignete Gegenmaßnahmen eine Kollision mit einem entgegenkommenden, ausweichenden Fahrzeug verhindern können, wenn die ermittelten Randbedingungen eingehalten werden. In einem zweiten Testfall wurden Eingriffe von Ausweichassistenzsystemen im VIL untersucht und der Einfluss eines belegten Gegenfahrstreifens auf die Fahrerreaktion beleuchtet. Es zeigte sich, dass Fahrer in der untersuchten Fahrsituation berechnete Eingriffe von Ausweichassistenzsystemen situationsadäquat dämpfen konnten, wenn der Gegenfahrstreifen belegt war. Ein Vergleich mit etablierten Verfahren auf der Teststrecke zeigte, dass das VIL für die Evaluation von Kontrollierbarkeitsfragen eingreifender Fahrerassistenzsysteme der aktiven Sicherheit eine geeignete Prüfumgebung darstellt. Die VIL-Methode wurde parallel zum Entwicklungsprozess der KAB-Funktionen evaluiert und verifiziert, wodurch finale Prüfungen dieser Systeme vor Serienzulassung mit dem VIL möglich sind.

### **Anmerkung:**

Dieser Beitrag entstand 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.

## 5 Literaturverzeichnis

- AKTIV (2011): Ergebnisbericht. Aktiv - gemeinsam Zukunft erfahren. Online verfügbar unter [http://www.aktiv-online.org/deutsch/Downloads/Broschueren/Ergebnisbuch\\_aktiv\\_gesamt.pdf](http://www.aktiv-online.org/deutsch/Downloads/Broschueren/Ergebnisbuch_aktiv_gesamt.pdf).
- Berg, G., Färber, B. (2015): Vehicle in the Loop. In: H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz und C. Singer (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. 3. überarbeitete und ergänzte Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien, S. 155–163.
- Dang, T., Desens, J., Franke, U., Gavrilă, D., Schäfers, L., Ziegler, W. (2012): Steering and evasion assist. In: A. Eskandarian (Hrsg.): Handbook of Intelligent Vehicles. London, New York: Springer, S. 760–782.
- Ebel, S., Wilhelm, U., Grimm, A., Sailer, U. (2010): Ganzheitliche Absicherung von Fahrerassistenzsystemen in Anlehnung an ISO 26262. In: Fahrerassistenz und integrierte Sicherheit. 26. VDI/VW-Gemeinschaftstagung. Wolfsburg, 06.-07.10. Düsseldorf: VDI Verlag (VDI-Berichte, 2104), S. 393–405.
- Fach, M., Baumann, F., Breuer, J., May, A. (2010): Bewertung der Beherrschbarkeit von Aktiven Sicherheits- und Fahrerassistenzsystemen an den Funktionsgrenzen. In: Fahrerassistenz und integrierte Sicherheit. 26. VDI/VW-Gemeinschaftstagung. Wolfsburg, 06.-07.10. Düsseldorf: VDI Verlag (VDI-Berichte, 2104), S. 425–435.
- Färber, B. (2015): Vom Tempomat zur automatischen Längsführung – Fragen und Antworten zur Beherrschbarkeit. In: K. Kompass (Hrsg.): Fahrerassistenz und Aktive Sicherheit. Wirksamkeit - Beherrschbarkeit -Absicherung. Essen, 16.-17.04.
- Fecher, N., Regh, F., Habenicht, S., Hoffmann, J., Winner, H. (2008): Test- und Bewertungsmethoden für Sicherheitssysteme der Bahnführungsebene. In: at - Automatisierungstechnik 56 (11), S. 592-600.
- Gasser, T. M., Seeck, A., Smith, B. W. (2015): Rahmenbedingungen für die Fahrerassistenzentwicklung. In: H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz und C. Singer (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. 3. überarbeitete und ergänzte Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien, S. 27–54.
- Heesen, M., Dziennus, M., Hesse, T., Schieben, A., Brunken, C., Löper, C. (2015): Interaction design of automatic steering for collision avoidance: challenges and potentials of driver decoupling. In: IET Intelligent Transportation Systems 9 (1), S. 95–104.
- Kompass, K., Domsch, C., Kates, R. E. (2012): Integral safety. In: A. Eskandarian (Hrsg.): Handbook of Intelligent Vehicles. London, New York: Springer, S. 710–727.
- Lehsing, C., Bengler, K., Busch, F., Schendzielorz, T. (2013): UR:BAN – the German research initiative for user centered driver assistance. In: mobil TUM. München.
- Neukum, A., Naujoks, F., Kappes, S., Wey, T. (2014): Kontrollierbarkeit unerwarteter Eingriffe eines Bremsassistenzsystems aus Perspektive des Folgeverkehrs. In: B. Färber (Hrsg.): 9. Workshop Fahrerassistenzsysteme. FAS 2014. Walting im Altmühltal, 26.-28.03, S. 115–125.
- Neukum, A., Ufer, E., Pauling, J., Krüger, H.-P. (2008): Controllability of superposition steering system failures. In: steering.tech 2008. München, 31.03.-01.04.

- Purucker, C., Rüger, F., Schneider, N., Neukum, A., Färber, B. (2014): Comparing the perception of critical longitudinal distances between dynamic driving simulation, test track and Vehicle in the Loop. In: N. Stanton, G. Di Bucchianco, A. Vallicelli und S. Landry (Hrsg.): Advances in human aspects of transportation. Proceedings of the 5th AHFE Conference. Krakau, Polen, 19.-23.07., S. 421–430.
- Pütz, A., Zlocki, A., Eckstein, L. (2014): Driver reaction to system initiated evasive manoeuvres. In: 10th ITS European Congress. Helsinki, Finnland, 16.-19.06.
- RESPONSE Consortium (2009): Code of practice for the design and evaluation of ADAS. V5.0: RESPONSE 3: a PReVENT Project.
- ISO 26262, 2011: Road vehicles - Functional Safety.
- Rüger, F., Purucker, C., Schneider, N., Neukum, A., Färber, B. (2014): Validierung von Engstellenszenarien und Querdynamik im dynamischen Fahrsimulator und Vehicle in the Loop. In: B. Färber (Hrsg.): 9. Workshop Fahrerassistenzsysteme. FAS 2014. Walting im Altmühltal, 26.-28.03, S. 137–146.
- Vision Zero Initiative (2011). Online verfügbar unter <http://www.visionzeroinitiative.com>, zuletzt geprüft am 26.02.2015.
- Weitzel, A. (2013): Objective controllability assessment for unintended ADAS reactions. In: M. Maurer und H. Winner (Hrsg.): Automotive Systems Engineering. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 135–145.
- Winner, H. (2012): Frontkollisionsschutzsysteme. In: H. Winner, S. Hakuli und G. Wolf (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, S. 522–542.