

Fahrerverhaltensmodellierung für die prospektive, stochastische Wirksamkeitsbewertung von Fahrerassistenzsystemen der Aktiven Fahrzeugsicherheit

Dipl.-Ing. Marcus Mai, Kurzzusammenfassung zur Dissertation

Die Aktive Sicherheit von Kraftfahrzeugen ist im Vergleich zur Passiven Sicherheit ein recht junges Themengebiet, da eine nennenswerte Durchdringung des Verkehrs erst mit dem breiteren Einsatz von Fahrwerkregelsystemen wie ABS und ESP ab den 1990er Jahren zu verzeichnen ist. Fahrerassistenzsysteme (FAS) der Aktiven Sicherheit, die darüber hinaus proaktiv und nicht nur reaktiv der Unfallvermeidung dienen (d.h. Vermeidung einer kritischen Situation, bevor diese überhaupt entsteht), werden seit ungefähr 10 Jahren im Serienbetrieb eingesetzt. Die Wirksamkeitsbewertung dieser FAS in Bezug auf das reale Unfallgeschehen stellt bis heute eine Herausforderung dar, da sich die vielfältigen Wechselwirkungen zwischen den FAS und den einzelnen Elementen des Verkehrssystems prospektiv schwer quantifizieren lassen. Aus diesem Grund stehen derzeit bei der Entwicklung und Absicherung dieser Systeme in erster Linie Fragestellungen der funktionalen Sicherheit im Vordergrund.

Um dem Potential eines FAS in der Bewertung durch Verbraucherschützer gerecht zu werden, beziehungsweise zukünftige Konzepte während der Entwicklung optimal an das reale Verkehrsgeschehen anzupassen, ist ein ganzheitlicher Bewertungsansatz für die Wirksamkeit bezüglich Unfallgeschehen unerlässlich. Ein solcher Bewertungsansatz wird im Rahmen dieser Arbeit skizziert, der vor allem in der frühen Entwicklungsphase numerische Methoden anwendet. Die stochastische Verhaltenssimulation der Verkehrsteilnehmer wird als größte Lücke identifiziert.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines ersten Fahrerverhaltensmodells, das für die prospektive, stochastische Wirksamkeitsbewertung von FAS der Aktiven Sicherheit geeignet ist.

In Kapitel 2 wird der Stand der Forschung dargelegt, der für die Modellbildung relevant ist. Aus verschiedenen, phänomenologischen Definitionen des Fahrerverhaltens mit Fokus auf kritische Situationen (z.B. Stufenmodell der Gefahrenkognition nach Schlag¹ und Bremsreaktionszeitmodell nach Burckhardt²) wird die Struktur des Fahrerverhaltensmodells abgeleitet, die sich aus den vier Teilmodellen *Informationsaufnahme*, *Informationsverarbeitung und Entscheidungsfindung*, *Handlungsauswahl* und *Handlungsausführung* zusammensetzt. Abbildung 1 veranschaulicht die Modellstruktur.

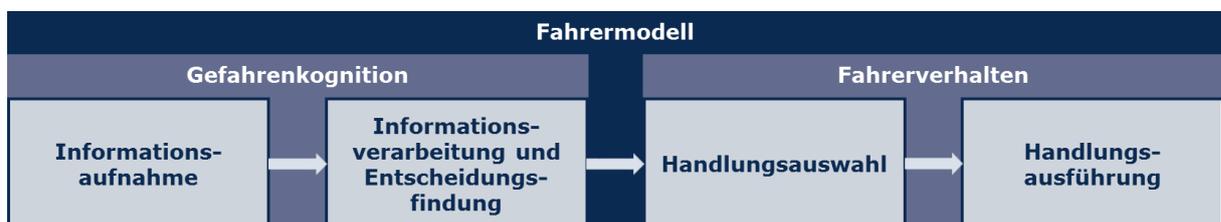


Abbildung 1: Phänomenologische Modellstruktur des numerischen Fahrerverhaltensmodells

Weiterführend werden in Kapitel 2 bestehende Kenntnisse aus der Literatur den einzelnen Teilmodellen zugeordnet und Lücken identifiziert, die zunächst keine durchgängige Modellbildung basierend auf den bestehenden Inhalten ermöglichen. Diese Lücken sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die Fragestellungen der Teilmodelle *Handlungsauswahl* und *Handlungsausführung* werden integral betrachtet, da sich die Mechanismen auf parametrischer Ebene nur schwer voneinander trennen lassen.

¹ SCHLAG, B., PETERMANN, I., WELLER, G. & SCHULZE, C. (2009), *Mehr Licht - Mehr Sicht - Mehr Sicherheit? Zum Einfluss unterschiedlicher Licht- und Sichtverhältnisse auf das Fahrerverhalten*, Wiesbaden, Verlag für Sozialwissenschaften, VS Research.

² BURCKHARDT, M. (1985), *Reaktionszeiten bei Notbremsvorgängen*, Köln, Verlag TÜV Rheinland.

Tabelle 1: Zusammenfassung der identifizierten, offenen Fragestellungen hinsichtlich des Stands der Forschung

Informationsaufnahme	Informationsverarbeitung und Entscheidungsfindung	Handlungsauswahl und Handlungsausführung
Wie ist die Blickverteilung im vorausliegenden Verkehrsraum hinsichtlich vertikalem und horizontalem Blickwinkel $\varphi_{env,V}$ und $\varphi_{env,H}$ zu beschreiben?	Wie lässt sich der subjektive Schwellwert $\tau_{min,throttle}$ der Time-To-Collision zum Hindernis beschreiben, bei dessen Unterschreiten der Fahrer den Fuß vom Gaspedal nimmt?	Wie lässt sich die Umsetzzeit ³ mt_{sur} auf eine überraschende Reaktionsaufforderung wie ein Hindernis beschreiben?
Wie ist die Lidschlaghäufigkeit t_{bli} zu beschreiben?	Wie lässt sich der subjektive Schwellwert $\tau_{min,brake}$ der Time-To-Collision zum Hindernis beschreiben, bei dessen Unterschreiten der Fahrer beginnt zur Bremsen?	Welche Änderung $\Delta mt_{sur,DAS}$ erfährt die Umsetzzeit mt_{sur} auf eine überraschende Reaktionsaufforderung durch das FAS?
Welche Anzahl $n_{sac,obs}$ an zusätzlichen Blicksprüngen führt der Fahrer nach Erscheinen des Hindernisses aus, bevor er dieses blickfixiert?	Wie lässt sich die Reaktions-Grundzeit ⁴ rbt_{sur} auf eine überraschende Reaktionsaufforderung wie ein Hindernis beschreiben?	Wie lässt sich der Restabstand sfm zum Hindernis bei einem erfolgreichen Bremsmanöver beschreiben?
Wie ist die Fixationsdauer d_{opt} auf optische Warnelemente des FAS zu beschreiben?	Welche Änderung $\Delta rbt_{sur,DAS}$ erfährt die Reaktions-Grundzeit rbt_{sur} auf eine überraschende Reaktionsaufforderung durch das FAS?	
Welche Anzahl $n_{sac,opt}$ an zusätzlichen Blicksprüngen führt der Fahrer nach Erscheinen der optischen Warnung aus, bevor er diese blickfixiert?		
Welche Änderung $\Delta n_{sac,obs,DAS}$ erfährt die Anzahl $n_{sac,obs}$ an zusätzlichen Blicksprüngen vor Blickfixation des Hindernisses durch das FAS?		

Diese Lücken werden mit Hilfe von Probandenstudien geschlossen, die an der Professur für Verkehrspsychologie der Technischen Universität Dresden durchgeführt wurden. Die Beschreibung dieser Studien und der daraus abgeleiteten Ergebnisse zur Beantwortung obiger Fragestellungen erfolgt in Kapitel 3. Die erhobenen Parameter werden in Tabelle 2 zusammengefasst.

³ Die Umsetzzeit beschreibt gemäß dem Bremsreaktionszeitmodell nach Burckhardt den Anteil der Gesamtreaktionszeit von der ersten motorischen Reaktion am Gaspedal bis zur Betätigung des Bremspedals.

⁴ Die Reaktions-Grundzeit beschreibt gemäß dem Bremsreaktionszeitmodell nach Burckhardt den Anteil der Gesamtreaktionszeit von der Blickfixierung des Hindernisses bis zur motorischen Reaktion an den Bedienelementen des Fahrzeugs.

Tabelle 2: Zusammenfassung der Studienergebnisse zur Beantwortung der offenen Fragestellungen

Informationsaufnahme	Informationsverarbeitung und Entscheidungsfindung	Handlungsauswahl und Handlungsausführung
$\varphi_{env,V}$: <ul style="list-style-type: none"> Normalverteilung Mittelwert = $-0,449^\circ$ Standardabweichung = $3,735^\circ$ 	$\tau_{min,throttle}$: <ul style="list-style-type: none"> Normalverteilung Mittelwert = $5,2$ s Standardabweichung = $2,2$ s 	mt_{sur} : <ul style="list-style-type: none"> Lognormalverteilung Mittelwert = 373 ms Standardabweichung = 138 ms
$\varphi_{env,H}$: <ul style="list-style-type: none"> Normalverteilung Mittelwert = $-0,786^\circ$ Standardabweichung = $1,433^\circ$ 	$\tau_{min,brake}$: <ul style="list-style-type: none"> Normalverteilung Mittelwert = $3,3$ s Standardabweichung = $0,9$ s 	$\Delta mt_{sur,DAS}$: <ul style="list-style-type: none"> Änderung der Lognormalverteilung ΔMittelwert = 56 ms ΔStandardabweichung = 22 ms
t_{bli} : <ul style="list-style-type: none"> Lognormalverteilung Mittelwert = $9,284$ s Standardabweichung = $9,619$ s 	rbt_{sur} : <ul style="list-style-type: none"> Lognormalverteilung Mittelwert = 537 ms Standardabweichung = 247 ms 	sfm : <ul style="list-style-type: none"> Gammaverteilung $A = 1,502$ $B = 2,452$ m
$n_{sac,obs}$: <ul style="list-style-type: none"> Poisson-Verteilung $\lambda = 2,065$ 	$\Delta rbt_{sur,DAS}$: <ul style="list-style-type: none"> Änderung der Lognormalverteilung ΔMittelwert = -70 ms ΔStandardabweichung = 101 ms 	
d_{opt} : <ul style="list-style-type: none"> Lognormalverteilung Mittelwert = 292 m Standardabweichung = 88 ms Minimalwert = 150 ms 		
$n_{sac,opt}$: <ul style="list-style-type: none"> Poisson-Verteilung $\lambda = 0,586$ 		
$\Delta n_{sac,obs,DAS}$: <ul style="list-style-type: none"> Änderung der Poisson-Verteilung $\Delta\lambda = 0,335$ 		

Aus den Erkenntnissen von Kapitel 2 und 3 wird in Kapitel 4 das Fahrerverhaltensmodell aufgebaut. Die Beschreibung der Modellbildung erfolgt entlang der vier oben genannten Teilmodelle.



In Kapitel 5 wird die Überprüfung des stochastischen Modellverhaltens durchgeführt. Die Vergleichsdaten entstammen dem Probandenkollektiv eines Realfahrversuchs, der ebenfalls in Kapitel 3 beschrieben wird. Die Methodik wird eigens für die Überprüfung des Modellverhaltens eines stochastischen Verhaltensmodells entwickelt und basiert auf der Durchführung von statistischen Unterschiedstests. Hierbei wird die Hypothese aufgestellt, dass die reale Stichprobe und die simulierte Stichprobe aus derselben Population stammen, falls sich kein signifikanter Unterschied in ihrem Verhalten feststellen lässt. In diesem Fall bildet das Fahrerverhaltensmodell das reale Fahrerverhalten korrekt ab.

Es zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen simuliertem und realem Fahrerverhalten, die sich zum großen Teil mit der nur bedingten Übertragbarkeit des Szenarios aus der Probandenstudie auf das reale Verkehrsgeschehen begründen lassen. Zum einen stellt das Hindernis im Realfahrversuch das einzige dynamische Objekt im Verkehrsraum dar, sodass dessen Detektion und Lokalisation (Aufgaben des Teilmodells *Informationsaufnahme*) durch die Probanden wesentlich einfacher und schneller erfolgt, als in einem realen Verkehrsszenario mit (unter Umständen) konkurrierenden, visuellen Reizen. Zum anderen besteht das Hindernis aus einem Vorhang, der über der Fahrbahn entfaltet wird und daher einen Reiz darstellt, der im realen Verkehr nicht vorkommt. Die Bewertung von Relevanz und Gefährdungspotential dieses Hindernisses (Aufgaben des Teilmodells *Informationsverarbeitung und Entscheidungsfindung*) durch die Probanden ist daher erschwert und erfolgt wesentlich langsamer, als in einem realen Verkehrsszenario zu erwarten. Die Korrektheit des stochastischen Modellverhaltens lässt sich mit den vorliegenden Vergleichsdaten daher nicht eindeutig bewerten. Es wird somit die Durchführung einer weiteren Probandenstudie empfohlen.

Des Weiteren zeigt sich jedoch auch eine Singularität des Modellverhaltens bei gleichzeitiger Darbietung von Warnung und Hindernis: Aufgrund der Parametrierung nimmt das Modell stets den Fuß vom Gaspedal, bevor das Hindernis blickfixiert ist. Im realen Fahrerverhalten lässt sich dieses Verhalten auch beobachten, jedoch nicht ausschließlich. In Kapitel 5 werden zudem weitere mögliche Fehlerquellen in der Modellierung aufgezeigt, die im Zuge einer erneuten Überprüfung zu adressieren sind. Diese bestehenden Ungenauigkeiten in der submikroskopischen Simulation sind derzeit vorhanden und müssen beim Einsatz des Fahrerverhaltensmodells bedacht werden!

Obwohl die Korrektheit des Modellverhaltens nicht eindeutig belegbar ist, wird in Kapitel 6 eine erste Wirksamkeitsbewertung eines prototypischen FAS im Rahmen eines Szenarios mit querendem Fußgänger durchgeführt, um die Anwendbarkeit des Fahrerverhaltensmodells zu demonstrieren. Dazu wird das Prinzip der *Virtuellen Probandenstudie* entwickelt, das auf der anforderungsgerechten Ermittlung des zu simulierenden Stichprobenumfangs beruht. Für zwei sehr große Stichprobe von jeweils 66.564 Probanden werden Simulationen des Fußgängerszenarios mit und ohne FAS durchgeführt. Mit Hilfe von statistischen Unterschiedstests können signifikante Unterschiede in der Kollisionshäufigkeit, in der Unfallschwere und in der Gesamtreaktionszeit des Fahrers nachgewiesen werden. Damit liegen objektive Bewertungsmaße für die Wirksamkeit des FAS vor:

1. Die Streuung der Gesamtreaktionszeit lässt sich durch den Einsatz des FAS reduzieren. Dies wird beispielsweise bei der Betrachtung des Interquartilabstands deutlich, der von 885 ms auf 705 ms sinkt. D.h. die Streuung der wahrscheinlichsten 50 % der Gesamtreaktionszeitverteilung reduziert sich um 20 %.
2. Dadurch lässt sich der Anteil der Fahrer, die vor einer eventuellen Kollision überhaupt eine Reaktion zeigen, um 10,1 % erhöhen.
3. Diese beiden Effekte bewirken, dass sich die Kollisionshäufigkeit durch den Einsatz des FAS um 51,9 % reduzieren lässt.
4. In den verbleibenden Kollisionen lässt sich die Unfallschwere durch den Einsatz des FAS zudem deutlich reduzieren. Die Geschwindigkeitsreduktion (Kollisionsgeschwindigkeit bezogen auf Ausgangsgeschwindigkeit) nimmt in der zentralen Tendenz deutlich zu (Median steigt von 48,1 % auf 58,2 %), wobei gleichzeitig die Streuung deutlich reduziert wird (Interquartilabstand sinkt von 36,5 % auf 5,2 %).