

## Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung / Übersicht .....	2
2. Abgrenzung Komfortsysteme/Sicherheitssysteme .....	2
3. Übersicht Entwicklungsprozess .....	3
4. Verkehrskonfliktfragebogen .....	4
5. Potenzialabschätzung verschiedener Sicherheitsfunktionen .....	7
6. Fahreraufmerksamkeitserkennung anhand Fahrerverhalten für den Einsatz in Auffahrwarnsystem .....	10
6.1 Einführung und Hintergrund .....	11
6.2 Experiment: Vorversuch .....	12
6.3 Aufmerksamkeitsschätzer .....	13
6.4 Experiment: Hauptversuch .....	14
6.5 Zusammenfassung .....	16
Literaturverzeichnis .....	16

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 4.1: Konflikttypenverteilung .....	5
Abbildung 4.2: Unfalltypen aus der amtlichen Unfallstatistik .....	5
Abbildung 4.3: Fahrerreaktionen .....	6
Abbildung 6.1: Warnsystem mit AMS .....	11
Abbildung 6.2: Reaktionszeiten bei FBS mit $a_f = -4,5 \text{ m/s}^2$ .....	13

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1: Unterstützungsbedarf und Wirksamkeitsabschätzung für Funktionen der Aktiven Sicherheit .....	7
Tabelle 6.1: Trefferquote des AMS in Event V .....	15

# Bausteine zur Entwicklung eines Systems der aktiven Sicherheit

Dr. Matthias Kopf,  
M. N. Farid,  
Dr. Joachim Steinle

BMW AG  
Entwicklung Fahrwerk  
D-80788 München

## 1. Einleitung / Übersicht

In diesem Beitrag werden beispielhaft Entwicklungsschritte und Methoden aus der Entwicklung eines Sicherheitssystems im Fahrzeug mit den wesentlichen Funktionen Auffahrwarnung und Bremsunterstützung dargestellt. Nach einer kurzen Abgrenzung der Sicherheitssysteme von den Komfortsystemen wird der prototypische Entwicklungsgang eines Sicherheitssystems mit den drei Säulen Werkzeugentwicklung, Funktionsentwicklung und Systembewertung vorgestellt. Dann werden einzelne Schritte daraus vertieft:

Für die Bedarfsermittlung und Effektivitätsabschätzung wurde ein eigener Verkehrskonfliktfragebogen entwickelt, der anhand einer kleineren Stichprobe getestet wurde. Daraus werden Ergebnisse vorgestellt und Rückschlüsse auf die Auslegung und das Konfliktvermeidungspotenzial von zwei Sicherheitsfunktionen gezogen.

Als Beispiel eines Entwicklungsschritts aus der frühen Phase der Entwicklung werden dann für zwei Sicherheitsfunktionen Potenzialabschätzungen vorgestellt, die auf einer dafür speziell entwickelten Simulationsumgebung basieren.

Da gerade Auffahrwarnsysteme aufgrund von möglichen Fehlwarnungen hinsichtlich der Fahrerakzeptanz kritisch sind, wird im weiteren vorgeschlagen, ein Modul zur Fahreraufmerksamkeitserkennung einzusetzen, das Fehlwarnungen reduzieren kann. Dazu werden nach der Vorstellung der Modulstruktur eines Auffahrwarnsystems Arbeiten zur Fahreraufmerksamkeitserkennung geschildert. In diesem Zusammenhang werden Ergebnisse aus Fahrsimulatorversuchen dargestellt.

## 2. Abgrenzung Komfortsysteme/Sicherheitssysteme

Die hier betrachteten Systeme der aktiven Sicherheit basieren auf einer Weiterentwicklung bereits bekannter oder in Entwicklung befindlicher Fahrerassistenzsysteme mit Umfeldsensorik (z.B. ACC), die als Komfortsysteme den Fahrer in bestimmten Situationen unterstützen bzw. an die der Fahrer die Fahraufgabe in gewissen Grenzen delegieren kann. Bei den Fahrerassistenzsystemen bleibt der Fahrer voll für die Fahraufgabe verantwortlich und kann jederzeit durch eigene Aktivitäten (Bremsen, Lenken, Gasgeben) das Systemverhalten übersteuern, d.h. seine Aktion hat oberste Priorität.

Sicherheitssysteme sollen dagegen in Situationen wirksam werden, in denen der Fahrer aus verschiedenen Gründen nicht / zu spät / falsch reagiert hat bzw. (z.B. bei Warnsystemen) gerade im Begriff ist, dies zu tun. Dies kann auch bedeuten, dass die Aktionen des Fahrers hinsichtlich der Fahrzeugführung in gewissen Grenzen modifiziert werden, so wie dies heute bei Systemen der Fahrzeugstabilisierung oder Schlupfregelung bereits der Fall ist (z.B. ABS, ASC, DSC, AFS,...)

Daraus resultiert im Vergleich zu Komfortsystemen naturgemäß eine völlig andere Erwartungshaltung gegenüber Sicherheitssystemen, die die Fahrzeugführung beeinflussen.

Dies gilt insbesondere für die Erwartungen an folgende Punkte:

- Funktionszuverlässigkeit
- Häufigkeit von Fehlreaktionen
- Potentielle Auswirkungen von Fehlreaktionen
- Ausfallsicherheit

Um diesen Punkten geeignet Rechnung zu tragen, werden im folgenden „Einzelbausteine“ vorgestellt, die trotz der dargestellten Herausforderungen zur erfolgreichen Entwicklung und Applikation von ersten Ausprägungen dieser Sicherheitssysteme beitragen können.

### 3. Übersicht Entwicklungsprozess

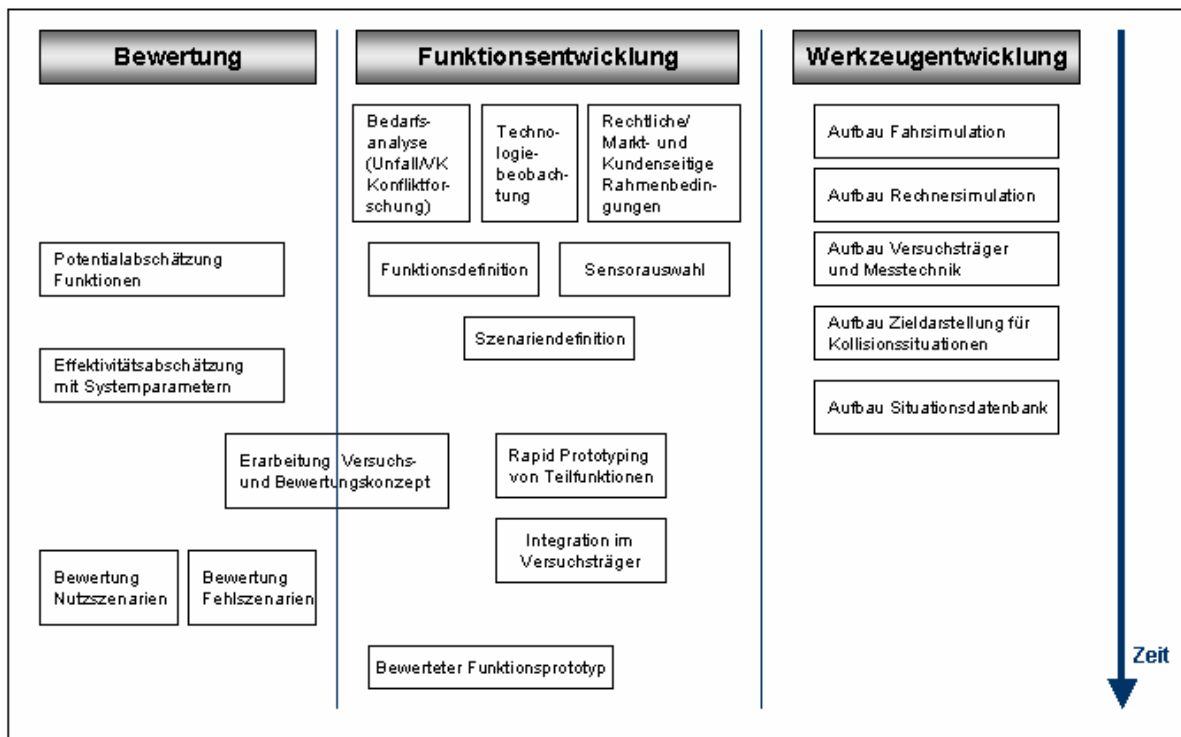


Abbildung 3.1: Übersicht Entwicklungsprozess

Der Entwicklungsprozess eines Systems der Aktiven Sicherheit ist durch die drei Säulen

- Werkzeugentwicklung
- Funktionsdarstellung
- Bewertung

gekennzeichnet.

Bei der **Werkzeugentwicklung** fällt der hohe Anteil an Simulationswerkzeugen (Rechnerimulation und Fahrsimulation) gegenüber dem klassischen Entwicklungsprozess eines Assistenzsystems auf. Dies ist jedoch unabdingbar notwendig, um sicherheitskritische Situationen im frühen Entwicklungsstadium überhaupt zugänglich machen zu können. Die Rechnerimulation eignet sich je nach Ausbaustand und Detaillierungstiefe der Systemmodule besonders für Effektivitätsabschätzungen und später für die Systemauslegung. In der (Festsitz-) Fahrsimulation können besonders effektiv Warnfunktionen entwickelt werden. Außerdem ist für die Bewertung des Systemverhaltens eine "kollisionsfeste" Zieldarstellung notwendig. Das kann eine aufwendige Zieldummy-Darstellung sein, wie sie z.B. schon [1] aufgebaut haben. Dabei ist an einem Trägerfahrzeug an einem seitlichen Ausleger die Silhouette eines Zielfahrzeugs (z.B. Heckteil eines PKW) befestigt. Diese ist mit Annäherungssensoren versehen und im Falle einer Kollision wird die Silhouette nach oben geklappt, so dass das Testfahrzeug ohne Beschädigung unter dem Ausleger durchfahren kann. Man kann sich neben dieser sehr aufwendigen Variante aber auch einfachere Konstruktionen vorstellen. Ein weiteres notwendiges Werkzeug ist die Situationsdatenbank. Gerade bei Sicherheitssystemen ist eine große Erprobungstiefe notwendig, die mit normalen Versuchsfahrten ökonomisch

misch kaum noch zu leisten ist. Da aber sowieso das gesamte System als Simulation verfügbar ist, kann man hier mit einem einmalig aufgenommenen Satz von Sensordaten, die dann einem Katalog von bestimmten Situationen zugeordnet werden, nach entwicklungsbedingten Systemänderungen diese Situationen einfach in der Simulation durchfahren und die Auswirkungen auf das Systemverhalten automatisch erfassen. Die automatische Erfassung setzt dann ihrerseits wieder ein klar definiertes Bewertungskonzept voraus.

In der Säule **Bewertung** ist vor allem der untere Teil interessant: er teilt sich in die Bewertung von Nutzsituationen (Situationen, in denen das System unterstützen soll) und Fehlersituationen, (Situationen, in denen das System **nicht** unterstützen soll, wo aber z.B. aufgrund der verwendeten Sensorik Fehlaktionen zu erwarten sind). Nutzsituationen sind hier ja die kritischen, kollisionssträchtigen Situationen. Diese sind am besten auf geschlossenem Testgelände mit entsprechenden Werkzeugen durchzuführen. Für die Bewertung von Fehlersituationen eignen sich die klassischen Testfahrten im realen Verkehr (evtl. mit abgeschalteter Aktorik) oder die Simulation, in der Sensorikmessdaten aus einer Situationsdatenbank in die Simulation des Systems eingespeist werden wie oben erläutert wurde. Für die Bewertung der Nutzsituationen kommen hauptsächlich Versuche auf dem Testgelände, ggf. mit dem oben erläuterten Zieldummy, in Frage.

Die **Funktionsentwicklung** teilt sich etwa in 4 Phasen auf:

In der ersten Phase wird zunächst eine auf Unfall- und Verkehrskonfliktstatistiken basierte Bedarfsanalyse durchgeführt. Parallel dazu muss ein Überblick über die vorhandene Technologie für Sensorik und Aktorik gewonnen werden und die rechtlichen bzw. markt- und kundenseitigen Rahmenbedingungen untersucht werden.

In der darauf aufbauenden zweiten Phase erfolgt die Funktionsdefinition und die Sensorauswahl und danach die Festlegung der Szenarien, d.h. vor allem die Definition von Nutzsituationen. Die Fehlersituationen können hier auch schon abgeschätzt werden, es werden sich aber im Verlauf der Entwicklung noch weitere ergeben.

Nun beginnt die Phase der eigentlichen Funktionsdarstellung zunächst im Rahmen von Rapid Prototyping mit verschiedenen Werkzeugen und später integriert im Versuchsträger. Parallel dazu wird ein Versuchs- und Bewertungskonzept erarbeitet als Grundlage für die praktische Bewertung und Absicherung des Systems. Am Ende der Funktionsentwicklung steht dann der bewertete Funktionsprototyp im Versuchsfahrzeug.

## 4. Verkehrskonfliktfragebogen

Wie in Kreisen der aktiven Sicherheit immer wieder beklagt wird, sind die offiziellen Unfallstatistiken noch stark von der passiven Sicherheit geprägt, d.h. Angaben zum Geschehen, welches zum Unfall geführt hat, sind sehr spärlich vorhanden. Aus diesem Grund wurde bei BMW ein Verkehrskonfliktfragebogen entwickelt, der vor allem den Unfallhergang beleuchtet. Gefragt wurde dabei nach der strukturierten Beschreibung von selbst erlebten Verkehrskonflikten, die nicht zwangsläufig in Unfällen endeten. Dieser Fragebogen wurde in einer internen Aktion, die mit einer Preisauslosung verbunden war, über zwei Entwicklungsbereiche verteilt. Von den Rückläufern konnten 61 Fragebögen ausgewertet werden. Es handelt sich dabei im Vergleich zu Unfallstatistiken um eine relativ kleine Stichprobe, die es aber sehr gut erlaubte, die Fragebogenstruktur und die Nützlichkeit der erhaltenen Daten zu bewerten. Entsprechend dem Mitarbeiterprofil stellten dabei die männlichen Fahrer ca. 95% der Beantworter. Das Altersspektrum lag zwischen 22 und 54 Jahren.

Die Auswertung wurde im wesentlichen in die drei Bereiche

- Konflikttypen
- Umgebungsparameter
- Fahrerreaktion
- Fahrerzustand

aufgeteilt. Die Ergebnisse aus Konflikttypen und Umgebungsparametern liefern dabei vornehmlich Erkenntnisse zur Auslegung der Sensorik und der Aktuatorik. Die Erkenntnisse aus Fahrerreaktion und Fahrerszustand können nützliche Hinweise zur Auslegung der konfliktmindernden Funktionen des Sicherheitssystems (z.B. Warnung, Bremsunterstützung) liefern. Zunächst wurde eine Einstufung in Konfliktschweregrade von 1 (leichter Konflikt) bis 4 (Unfall) vorgenommen, die stark an [2] angelehnt ist. Es ergaben sich dabei ca. 7% Unfälle. Die restlichen Konflikte verteilten sich etwa gleichmäßig über die Stufen 1 bis 3. Schon daran sieht man, dass man mit einem Verkehrskonfliktfragebogen erheblich mehr statistisch verwertbares Material sammeln kann als mit Unfallstatistik. Bei den Konflikttypen ergab sich die Aufteilung nach Abb. 4.1.

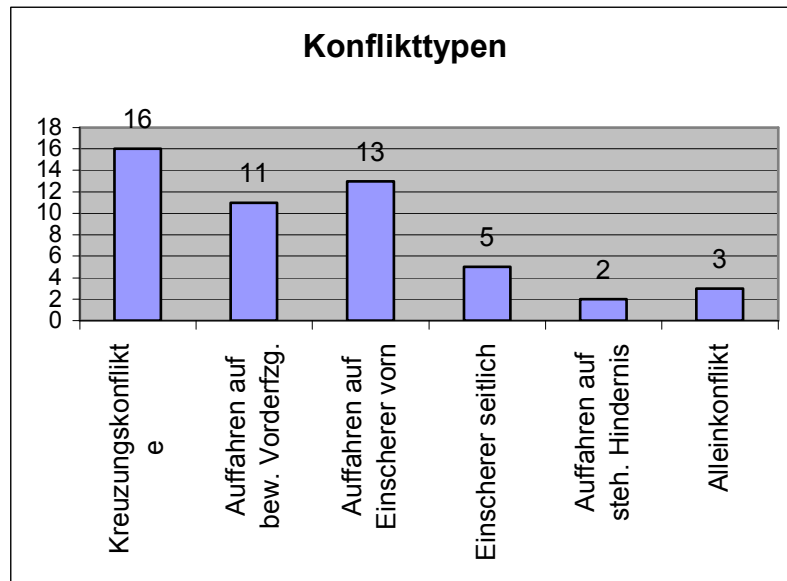


Abbildung 4.1: Konflikttypenverteilung

An dieser Stelle liegt es nahe, diese Verteilung mit der Verteilung der Unfalltypen (z.B. nach Abb. 4.2)

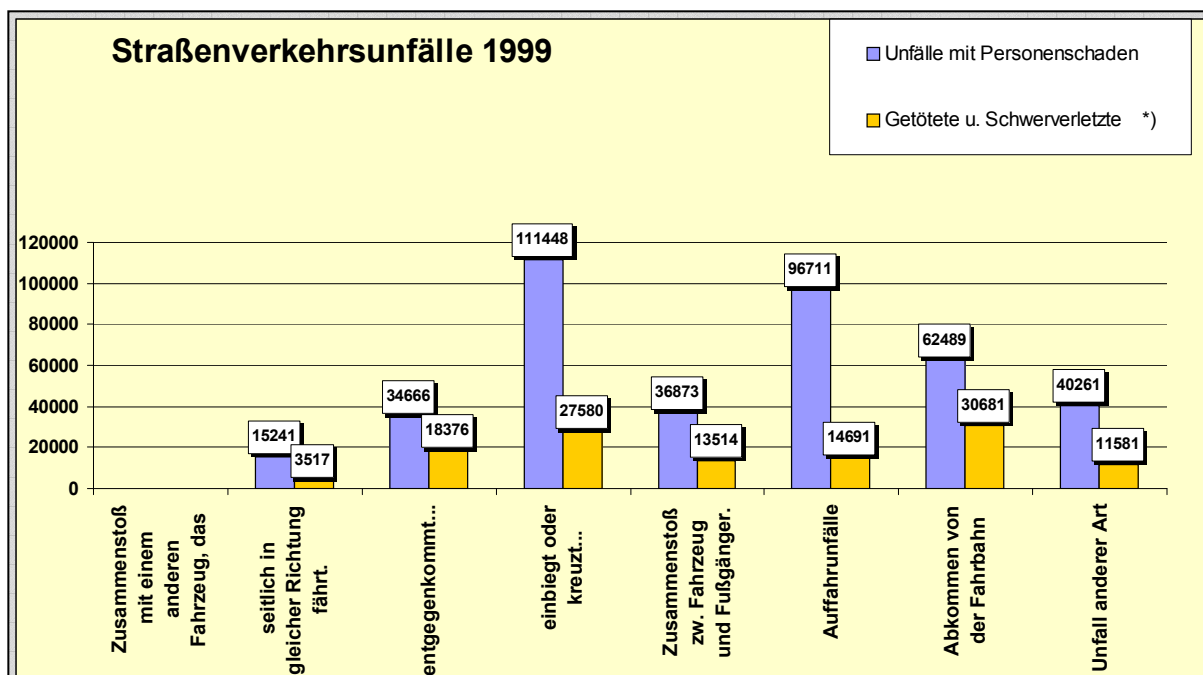


Abbildung 4.2: Unfalltypen aus der amtlichen Unfallstatistik

zu vergleichen um bei Übereinstimmung auf eine repräsentative Stichprobe zu schließen. Betrachtet man den Übergang von einem Verkehrskonflikt zu einem Unfall, so spielt dabei die Möglichkeit zur Konfliktbehebung eine große Rolle. Nur wenn diese Möglichkeit bei allen Konflikttypen gleichermaßen gegeben wäre, wäre eine vergleichbare Verteilung zu erwarten. Da es aber darüber noch keine gesicherten Erkenntnisse gibt, ist ein Vergleich zwischen Verkehrskonfliktstatistik und Unfallstatistik zum Zweck der Validierung nicht direkt zielführend.

Die Auswertung hinsichtlich der Umgebungsparameter Straßenzustand, Straßenverlauf und Sichtbedingungen ergab folgendes Bild: Die meisten Verkehrskonflikte fanden auf trockener Straße (82%), geraden Straßenstücken (50%) bzw. an Kreuzungen (25%), auf der Ebene (90%), bei Tag (70%) und bei unbehinderter Sicht (82%) statt. Dabei ist u.a. besonders interessant dass in Kurven nur ca. 8% der Verkehrskonflikte stattfanden.

Die Fahrerreaktionen ergaben sich nach Abb. 4.3

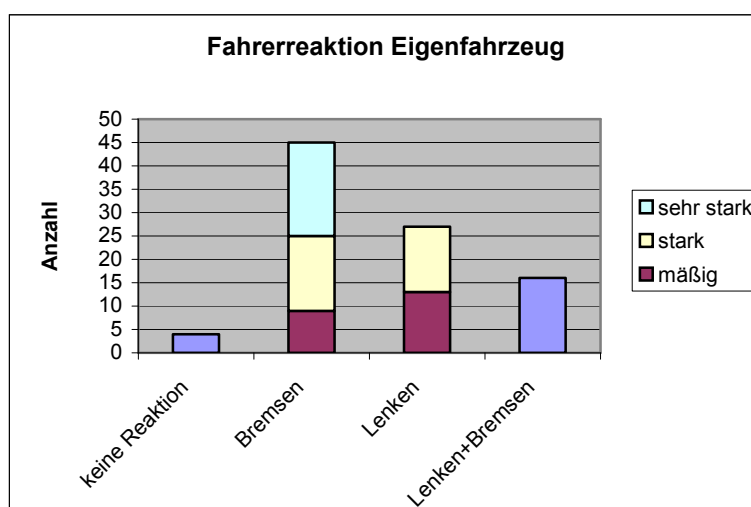


Abbildung 4.3: Fahrerreaktionen

Als eine große Stärke des Konfliktfragebogens erwiesen sich die Angaben zum Fahrerzustand während des Konflikts, wozu Unfallstatistiken üblicherweise sehr wenig beitragen können. Gefragt wurde vor allem nach dem eigentlichen Fahrerzustand (Müdigkeit, Krankheit etc.), nach der Aufmerksamkeit und nach eigenen bzw. fremden Fehlern. Danach spielten in immerhin 13% der Konflikte Müdigkeit, in 3% Monotonie und in 2% Krankheit eine Rolle. Hinsichtlich der Konfliktursache gaben etwa die Hälfte den Hauptfehler bei sich und die andere Hälfte den Hauptfehler beim Konfliktgegner an. "Ermutigend" für die Effektivität von Warnungen war die Erkenntnis, dass in etwa 40% der Konflikte die Aufmerksamkeit des Fahrers **nicht** auf den Konfliktgegner gerichtet war.

Eine Einzelfallauswertung speziell der Auffahrkonflikte ergab darüber hinaus, dass in Folge/Bremssituationen (siehe 6.2) der Konfliktgrund hauptsächlich in der visuellen oder mentalen Unaufmerksamkeit des Fahrers lag. Bei Auffahrsituationen (siehe 6.2) entstand der Konflikt im wesentlichen durch die Fehleinschätzung der Differenzgeschwindigkeit. Bei Einschersituationen ist der Konfliktgrund fast ausschließlich in der Unaufmerksamkeit des Konfliktgegners zu suchen.

Damit und zusammen mit Ergebnissen aus Fahrsimulatorversuchen ergibt sich eine erste Wirksamkeitsabschätzung für die beiden Funktionen Warnung und Bremsunterstützung gem. Tabelle 4.1. Dabei ist die „Kritikalität“ anhand des Kehrwerts der im Fahrsimulator gemessenen mittleren minimalen Zeitreserve ( $T_{res,min}$ ) für die entsprechende Situation berechnet worden. In [3] wird der Begriff Zeitreserve und deren Verbindung zur Gefährlichkeit einer Situation ausführlich behandelt.

Situation	Konflikt- häufig- keit nach BMW- Ver- kehrskon- fliktfra- gebogen	Unfall- häufig- keit nach GES - Daten- bank USA	Unterstützungsbedarf		Wirksamkeitsab- schätzung für Funktionen der akt. Sicherheit	
			Konfliktgrund (Auswertung Verkehrskon- fliktfragebogen)	Kritikalität (Fahrsimula- torversuche) ( $1/T_{res,min}$ )	War- nung	Brems- unter- stützung
Folge-/ Bremssi- tuation	12%	10%	Ablenkung/ Un- aufmerksamkeit d. Eigenfahrers	1	gut	gut
Auffahrssi- tuation mit be- wegtem Vorderfzg.	7%	3,5%	Fehleinschätzung d. Eigenfahrers	0,1	eingeschränkt bis gut	eingeschränkt bis gut
Auffahrssi- tuation mit ste- hendem Vorderfzg.	2%	8%	Fehleinschätzung d. Eigenfahrers	100	eingeschränkt	eingeschränkt
Einscher- situation ohne Fzg- Überlap- pung	20%	?	Unaufmerksam- keit d. Konflikt- partners	0,4	wenig	eingeschränkt
Einscher- situation mit Fzg- Überlap- pung	8%		Unaufmerksam- keit d. Konflikt- partners	n/a	unwirk- sam	unwirk- sam

**Tabelle 4.1: Unterstützungsbedarf und Wirksamkeitsabschätzung für Funktionen der Aktiven Sicherheit**

Insgesamt hat sich gezeigt, dass der Konfliktfragebogen in der bei BMW entwickelten Form eine sehr wertvolle Hilfe für die Definition und Auslegung von Systemen der Aktiven Sicherheit ist. Er wird daher weitergeführt werden.

## 5. Potenzialabschätzung verschiedener Sicherheitsfunktionen

Ein wichtiger Baustein am Beginn der Entwicklung eines Sicherheitssystems ist die Potenzialabschätzung. Hier wird anhand einer noch groben Vorstellung von der Wirkungsweise der Funktion abgeschätzt, welche Auswirkungen die Funktion in den Nutzenfällen auf die Verkehrssicherheit hat. Hierfür bietet sich die Rechnersimulation an. Bei BMW wurde zu diesem Zweck ein Simulationswerkzeug auf MATLAB/Simulink-Basis entwickelt. In folgenden wird beispielhaft dargestellt, wie mit einem solchen Werkzeug gearbeitet werden kann.

Als erstes wird der klassische Bremsassistent (BAS) untersucht. Dieses System erhöht im Falle einer erkannten Notbremsung den Bremsdruck bis in den ABS-Regelbereich und verkürzt damit den Bremsweg eines "schwachen Bremsers", der trotz des Vorsatzes für eine Notbremsung aufgrund zu schwacher Bremsbetätigung nicht die maximale Bremsverzögerung erreicht. Statistiken zeigen, dass bei bestimmten Unfallarten etwa ein Drittel der Fahrer überhaupt nicht bremst, ein weiteres Drittel (und das sind die Nutznießer des Bremsassistenten) keine Vollbremsung macht und nur das letzte Drittel in den Bereich maximaler Verzögerung kommt. Untersucht wurde hier der Basiseffekt des BAS, indem für zwei Situationsklassen eine "schwache Notbremsung" mit  $6m/s^2$  einer echten Notbremsung mit  $9m/s^2$

Kollisionsgeschwindigkeit in Auffahrsituation ohne BAS (schlechter Bremser)  
 ( $v_v=80$  km/h,  $t_{tcwarn}=3$ s,  $a_{brems}=-6$ m/s<sup>2</sup>)

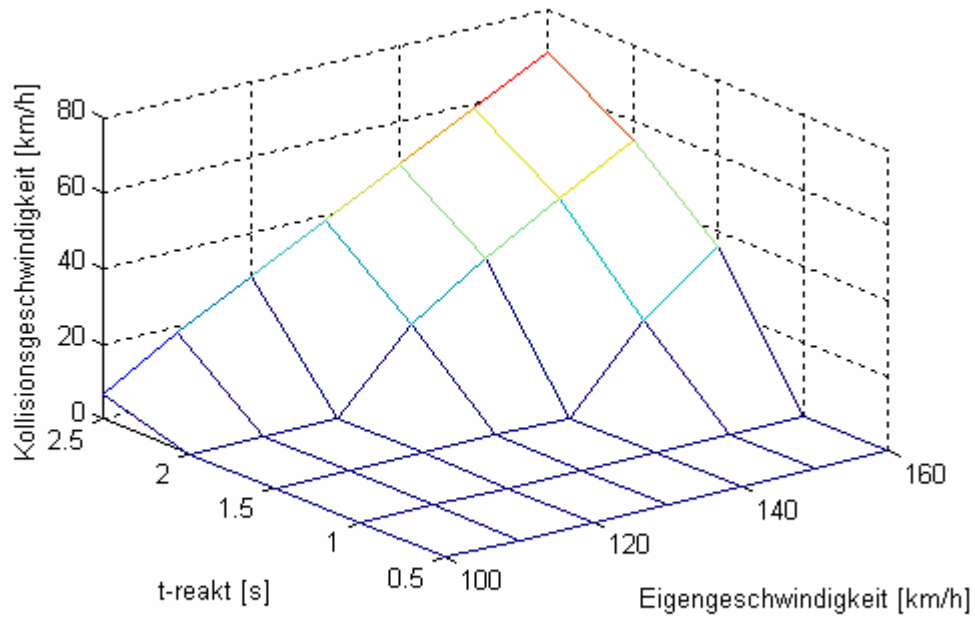


Abb. 5.1a: Kollisionsgeschwindigkeit bei Auffahrsituation **ohne** BAS

Kollisionsgeschwindigkeit in Auffahrsituation mit BAS  
 ( $v_v=80$  km/h,  $t_{tcwarn}=3$ s,  $a_{brems}=-9$ m/s<sup>2</sup>)

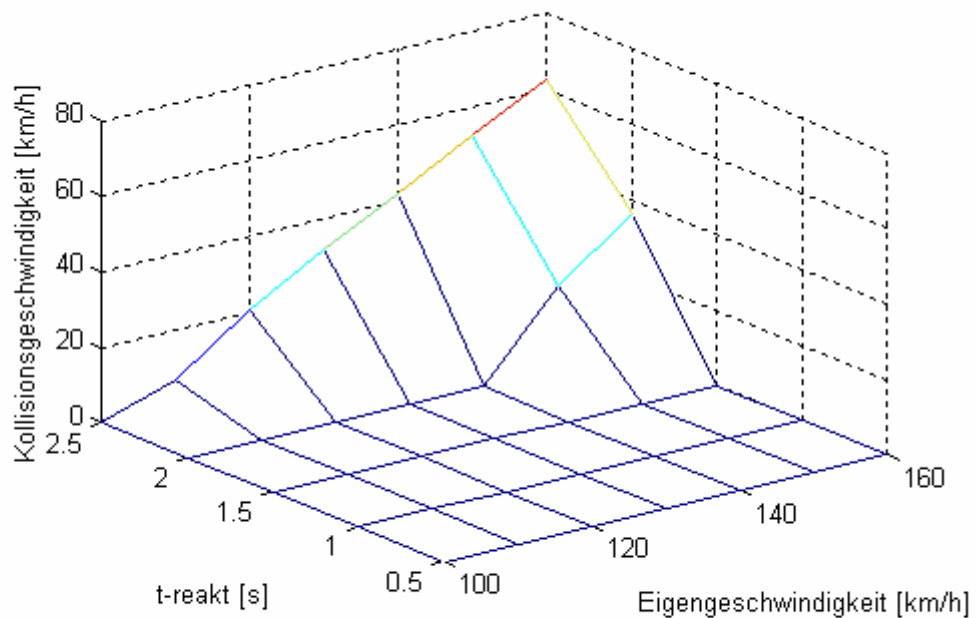


Abb. 5.1b: Kollisionsgeschwindigkeit bei Auffahrsituation **mit** BAS



gegenübergestellt wurde. Abb. 5.1 zeigt das Ergebnis für eine Klasse von Auffahrsituationen, bei denen das Vorderfahrzeug konstant mit 80 km/h fährt und das Eigenfahrzeug sich mit verschiedenen Geschwindigkeiten annähert. Für die Bremsreaktion wurde ein Standardzeitpunkt von  $TTC=3\text{sec}$  ( $TTC$ : Time to Collision) angenommen und die Zeit zwischen diesem Zeitpunkt und der tatsächlichen Bremsreaktion mit der Reaktionszeit  $t_{\text{reakt}}$  parametrisiert. Betrachtet man die Unterschiede in der Kollisionsgeschwindigkeit in beiden Bedingungen, so wird deutlich, dass im mittleren Bereich des Parameterraums Kollisionen überhaupt vermieden werden und am Rand dieses Bereichs die Kollisionsgeschwindigkeiten deutlich reduziert werden. Um den Effekt dieser Kollisionsgeschwindigkeitsreduktion von ca. 6 bis 36 km/h auf die Verkehrssicherheit abzuschätzen, kann man die aus BMW-internen Untersuchungen abgeleitete Faustregel anwenden, dass eine Reduktion der Kollisionsgeschwindigkeit um 20km/h unter bestimmten Annahmen (Aufprall auf ein feststehendes Hindernis) eine Reduktion der Verletzungsschwere um etwa eine MAIS-Klasse (MAIS = Maximum Abbreviated Injury Scale) bedeutet.

Als weiteres Anwendungsbeispiel soll hier die Auslegung eines Warnalgorithmus beschrieben werden. Die Fragestellung war hier, wie sich unterschiedliche Warnalgorithmen auf die Sicherheitsfunktion auswirken. Verglichen wird hier die Auslösung der Warnung nach einem  $TTC$ -Kriterium mit der Warmauslösung nach einem Bremszeitreservenkriterium (für Details zu beiden Kriterien siehe z.B. [2]). Es wurde wiederum die oben beschriebene Auffahrsituation untersucht. Es wird angenommen, dass bei Unterschreitung der  $TTC$ -Schwelle 2,5 sec bzw. bei Unterschreitung der Bremszeitreservenschwelle 1,5 sec ein Warnsignal ertönt. Nach der in der Untersuchung als Laufparameter verwendeten Reaktionszeit bremsst der Fahrer mit  $7\text{m/s}^2$ .

Abb. 5.2 zeigt das Ergebnis dieser Simulation.

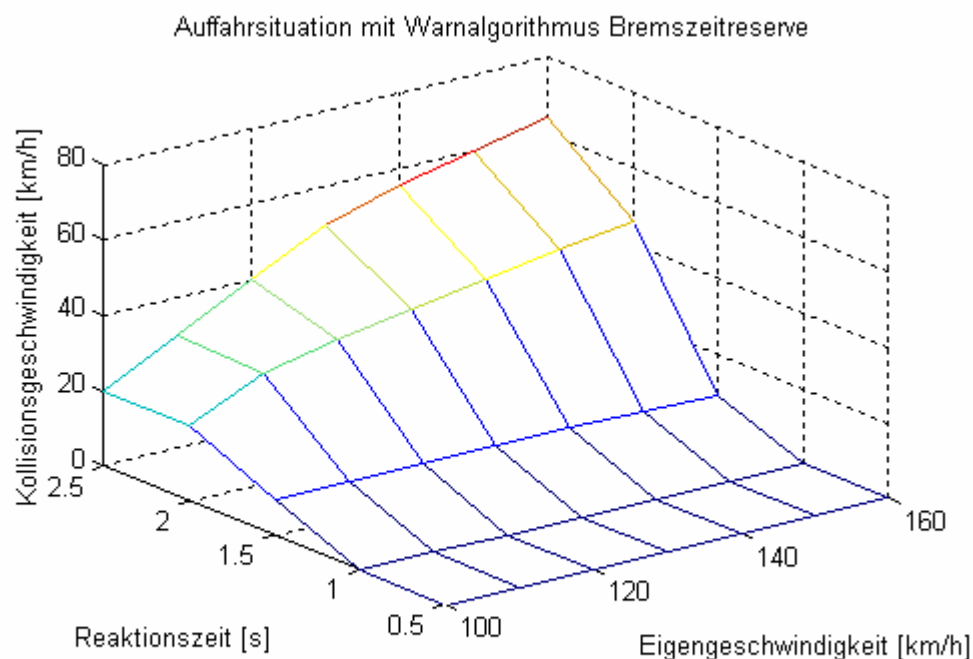


Abb. 5.2a: Auffahrsituation mit Warnalgorithmus Bremszeitreserve

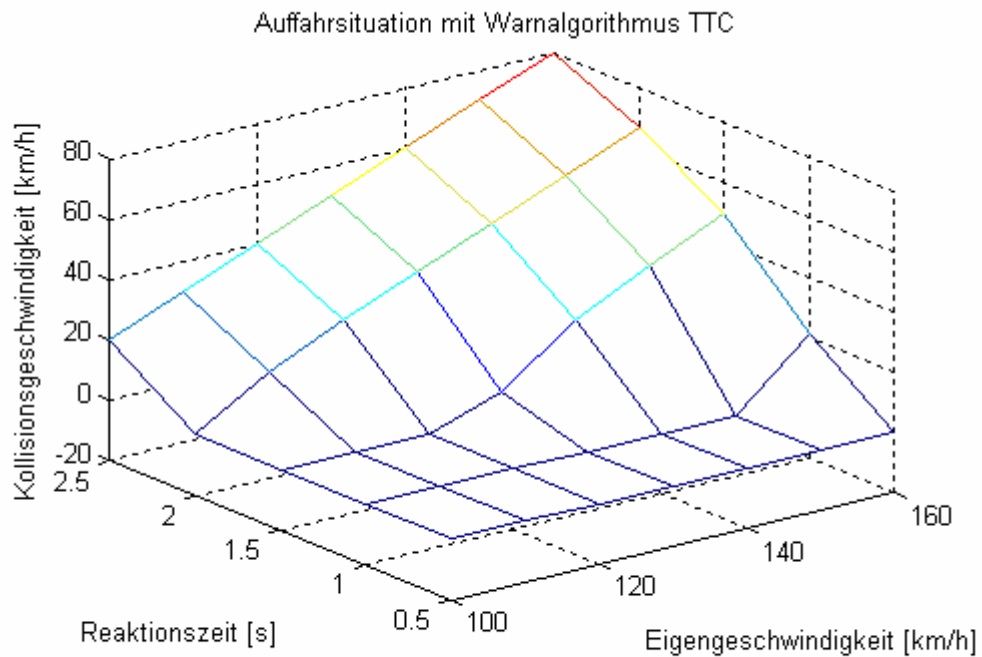


Abb. 5.2b: Auffahrsituation mit Warnalgorithmus TTC

Betrachtet man den Verlauf der Kollisionsgeschwindigkeiten mit steigenden Eigengeschwindigkeiten, so sieht man, dass beim TTC-Kriterium die Kollisionsgeschwindigkeiten ansteigen, während sie beim Zeitreservenkriterium bis zu Reaktionszeiten von 1,5 sec nahezu konstant sind. Für den Fahrer bedeutet dies, dass er bei Erhalt der TTC-Warnung je nach Geschwindigkeit seine Bremsstärke variieren muss, um die Kollision zu vermeiden bzw. die Kollisionsgeschwindigkeit um einen bestimmten Betrag zu vermindern. Erhält er hingegen eine Zeitreservenwarnung, so führt in weiten Grenzen unabhängig von der Geschwindigkeit die gleiche Bremsstärke zum gleichen Sicherheitseffekt. Daher ist zumindest hinsichtlich der Erwartungskonformität die Zeitreservenwarnung der TTC-Warnung vorzuziehen.

Anhand dieser beiden Beispiele konnte das Einsatzspektrum eines Simulationswerkzeugs für die Potenzialabschätzung und die Auslegung von Sicherheitsfunktionen gezeigt werden.

## 6. Fahreraufmerksamkeitserkennung anhand Fahrerverhalten für den Einsatz in Auffahrwarnsystem

Assistenz ist mehr als die Automatisierung einer Aufgabe, denn sie erfordert eine Übernahme von Tätigkeiten unter Berücksichtigung der Bedürfnisse und Gewohnheiten des Fahrers. Einerseits müssen in den Systemen die möglichen strategischen Wünsche des Fahrers in unterschiedlichen Situationen berücksichtigt werden, andererseits muss der Fahrerzustand (aufmerksam, ermüdet, überfordert usw.) aus den Fahrerreaktionen identifiziert werden [6].

In diesem Abschnitt wird dargestellt, wie ein Aufmerksamkeitschätzer, der als Input die Daten aus den Hauptbedienelemente des Fahrzeugs benutzt, die Warnausgabe eines Kollisionswarnsystems abhängig vom Aufmerksamkeitszustand des Fahrzeugführers optimiert.

## 6.1 Einführung und Hintergrund

Entscheidend für den Erfolg eines Systems auf dem Markt ist eine hohe Kundenakzeptanz. Hohe Akzeptanz wird erst dann gewährleistet sein, wenn die Assistenzsysteme gleichzeitig verlässlich und nutzerfreundlich sind [6].

Zur höheren Akzeptanz trägt die Berücksichtigung des Fahrerzustands bei. Mit ‚Fahrerzustand‘ ist allgemein die Zusammenfassung der kurz-, mittel- und langfristigen psychologischen und physiologischen persönlichen Faktoren gemeint, die das Fahrerverhalten beeinflussen [3].

Wer die ‚Nervigkeit‘ eines übermäßig warnenden Beifahrers kennt, der auch dann warnt, wenn der Fahrer bereits eine potentielle Gefahr erkannt hat, kann sich denken, wie schwierig es ist, ein Warnsystem zu konzipieren, das warnt, ohne den Fahrer zu bevormunden. Die Berücksichtigung des Fahrerzustandes ist bei einem Warnsystem um so wichtiger, da eine aus der Fahrersicht unbegründete Warnung als zusätzliche Belastung empfunden wird. Darüber hinaus kann die häufige, unnötige Warnung zur Verschlechterung des Fahrverhaltens führen.

Ein Kollisionswarnsystem braucht rechtzeitig Informationen darüber, ob der Fahrzeugführer die potentielle Gefahr erkannt und entsprechend darauf reagiert hat. Ein Fahrer, der die potentielle Gefahr erkannt und darauf reagiert, hat braucht die Warnung entweder gar nicht oder erst später, falls die gefahrenvermindernden Maßnahmen die Unfallgefahr nicht ausreichend reduzieren. Darüber hinaus sollen die Warnungen des Warnsystems für einen ermüdeten Fahrzeugführer früher ausgegeben werden als für einen situationsbewussten Fahrer. Es reicht also nicht, wenn beim Entwurf eines Warnsystems das Fahrzeug als ein isoliertes System betrachtet wird. Vielmehr muss die Interaktion zwischen dem Fahrzeug, der Verkehrsumwelt und dem Fahrzeugführer als ein System gesehen werden, dessen einzelne Faktoren sich gegenseitig beeinflussen (siehe Abbildung 6.1).

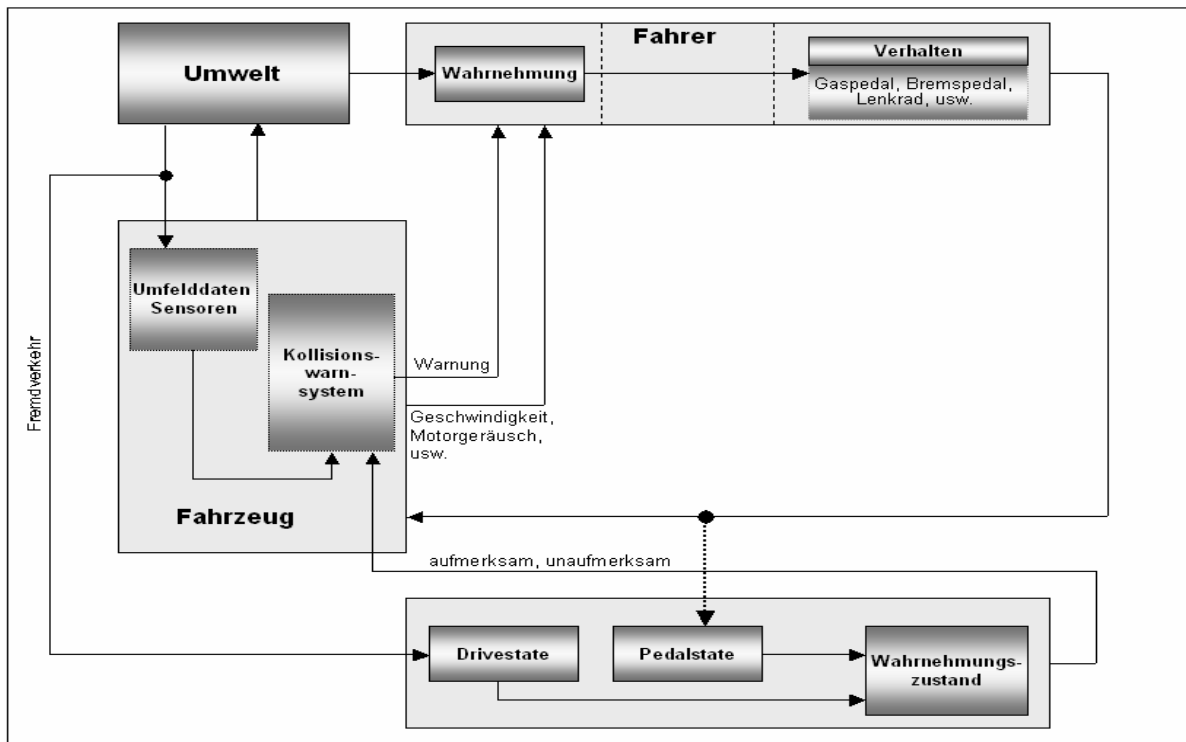


Abbildung 6.1: Warnsystem mit Aufmerksamkeitschätzer

Zu den Faktoren, die eine entscheidende Rolle für den Fahrerzustand spielen, ist seine Aufmerksamkeit. Die Aufmerksamkeit, die der Fahrer dem Fahrgeschehen widmet, wird während einer Fahrt durch mehrere Einflüsse, wie z.B. Ablenkung, Abwendung, Monotonie, Müdigkeit, Dauer der Fahrt, Geschehnisse in der Umwelt usw. beeinflusst.

Ziel der hier beschriebenen Studie ist es, die Fahreraufmerksamkeit in Auffahrsituationen (AS) und Folge/Bremssituationen (FBS) ohne direkte Messung der physiologischen Indikatoren zu bestimmen. Dafür werden die Fahrerreaktionen bei der Bedienung der Hauptbedienelemente, wie Gas- und Bremspedal untersucht.

## 6.2 Experiment: Vorversuch

Um Daten für einen Aufmerksamkeitsschätzer zu gewinnen, wurde eine Versuchsreihe in einem BMW-Fahrsimulator mit eingebautem automatischem Schaltgetriebemodell gestartet, die hier unter dem Begriff ‚Vorversuch‘ aufgeführt wird.

Im Versuch wurden hauptsächlich Folge/Bremssituationen und Auffahrsituationen untersucht. FBS entstehen, wenn das Eigenfahrzeug zunächst mit nahezu identischer Geschwindigkeit hinter einem Vorderfahrzeug fährt (Folgen) und das Vorderfahrzeug plötzlich bremst. AS sind gegeben, wenn die Eigengeschwindigkeit  $v_e$  wahrnehmbar größer ist als  $v_f$ , wobei das Vorderfahrzeug keine negative Beschleunigung (Bremsen) besitzt und sich beide Fahrzeuge auf der gleichen Spur befinden.

### Aufbau und Ablauf

Der Vorversuch wurde mit 14 Versuchspersonen (VP) auf trockener und ebener Autobahnstrecke durchgeführt. Die VP wurden dazu angehalten ihren normalen Fahrstil beizubehalten, die Verkehrsregeln zu beachten und die vorgegebenen Zielgeschwindigkeiten nach Möglichkeit einzuhalten.

In dem Simulator wurden Umfeld- und Fahrzeugdaten wie z.B. die Gaspedalstellung, Lenkradgeschwindigkeit, Bremspedalstellung sowie der Lenkradwinkel gemessen und protokolliert.

Drei verschiedene Fahrtrunden mussten von jeder VP absolviert werden, die jeweils ca. 15-20 Minuten dauerten, wobei während der zweiten Fahrt zusätzlich eine Nebenaufgabe erfüllt werden musste. Die Nebenaufgabe bestand darin, ein zufällig und abwechselnd in der rechten und linken Seite der Fahrscene erscheinendes Quadrat mit dem Blinker seitenrichtig zu quittieren. Die implementierten Events bestanden aus AS mit den Differenzgeschwindigkeiten ( $v_{diff}$ ) 40 (Event III) und 60 km/h (Event I) und FBS, bei denen das Vorderfahrzeug mit einer Bremsbeschleunigung ( $a_f$ ) von  $-2,5 \text{ m/s}^2$  und  $-4,5 \text{ m/s}^2$  (Event IV) verzögert.

### Ergebnis

Bei der Protokollauswertung wurden die Reaktionen der VP während der Versuchsfahrt mit Ablenkungsaufgabe mit denen ohne Ablenkungsaufgabe verglichen.

Die Ergebnisse des Vorversuchs können wie folgt zusammengefasst werden:

- Auffahrsituation:
  - Der Abstand zu dem Vorderfahrzeug, bei dem das Gaspedal losgelassen wird (Reaktionsabstand ‚ $d_{reakt,Gas}$ ‘) ist von der Differenzgeschwindigkeit ( $v_{diff}$ ) abhängig. Der Vergleich der Reaktionsabstände zwischen Event I ( $v_{diff} = 60 \text{ km/h}$ ) und Event III ( $v_{diff} = 40 \text{ km/h}$ ) zeigt, dass  $d_{reakt,Gas}$  bei den kleineren  $v_{diff}$  kleiner wird. War der Mittelwert von  $d_{reakt,Gas}$  bei  $v_{diff} = 60 \text{ km/h}$  ungefähr 188 m, so beträgt er bei einer  $v_{diff}$  von 40 km/h 160 m.
  - Der Abstand zu dem Vorderfahrzeug, bei dem das Bremspedal betätigt wird ( $d_{reakt,Brems}$ ) ist von der Differenzgeschwindigkeit  $v_{diff}$  abhängig.
  - Der Reaktionsabstand kann bei der AS als Zeichen für das Situationsbewusstsein des Fahrers interpretiert werden.
  - Eine zusätzliche Ablenkungsaufgabe führt zu kompensatorischem Verhalten, d.h. größere Reaktionsabstände und Zeitreserven. Die Zeitreserve ist die Zeit, die bei gegebenem Situationsaspekt noch verstreichen darf, bis die gefährdungsvermindernde

Aktion einsetzen muss, damit das räumliche Zusammentreffen der Gefahrenträger gerade noch verhindert werden kann [3].

- **Auffahr- und FBS:**
  - Das Lösen des Gaspedals ist die erste im Fahrzeug messbare Reaktion nach der Wahrnehmung einer potentiellen Gefahr in Auffahr- und FBS.
  - Die Geschwindigkeit des Lösen des Gaspedals ist umso höher, je kritischer die Situation wird. Die Geschwindigkeit der gefahrenvermindernden Maßnahme ist bei den AS niedriger als bei den FBS.

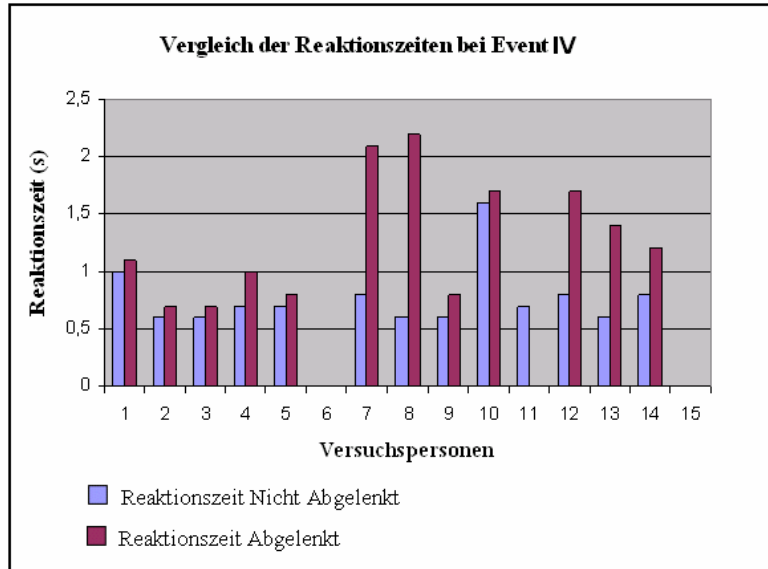


Abbildung 6.2: Reaktionszeiten bei FBS mit  $a_f = -4,5 \text{ m/s}^2$

- **Folge/Bremssituation:**
  - Die Reaktionszeit wird umso kürzer (bis zu einer Mindestreaktionszeit), je stärker das Vorderfahrzeug bremst.
  - Die Ablenkungsaufgabe verlängert die Reaktionszeiten  $T_{\text{reakt,Gas}}$  und  $T_{\text{reakt,Brems}}$ . Bei der FBS mit  $a_f = -4,5 \text{ m/s}^2$  beträgt die mittlere Reaktionszeit 0,8 s. Im zweiten Lauf (mit Ablenkung) verlängert sich die Reaktionszeit auf 1,2 s. Die Reaktionszeiten aller VP sind im abgelenkten Fall um mindestens 0,1 s länger geworden (siehe Abbildung 6.2).

### 6.3 Aufmerksamkeitsschätzer

Die Erkenntnisse aus dem Vorversuch werden beim Entwurf des Aufmerksamkeitsschätzers benutzt, um festzustellen, ob und wann der Fahrzeugführer die Existenz eines langsamer fahrenden Vorderfahrzeugs erkannt hat. Das Programm soll dazu benutzt werden, die Warnschwellen eines Auffahrkollisionswarnsystems abhängig vom aktuellen Aufmerksamkeitszustand des Fahrzeugführers zu setzen. Bei ‚Unaufmerksamkeit‘ werden die Warnschwellen so definiert, dass der Fahrer früher gewarnt wird. Sollte der Fahrer ‚aufmerksam‘ sein, kann die Warnung später erfolgen.

Der Algorithmus zur Aufmerksamkeitsschätzung besteht aus drei Funktionen., die als Entscheidungsbäume und Zustandsautomaten implementiert worden sind. Eine der drei Funktionen soll anhand der Umwelt und der Fahrzeugdaten die Fahrsituation erkennen. Mit der Fahrsituation ist die Lage des Fahrzeugs in Bezug zu den anderen Verkehrsteilnehmern gemeint. In dieser Funktion wird entschieden, ob es sich um eine Auffahr-, Folge-, Folge/Brems- oder eine andere Situation handelt.

Bei der Bestimmung der Zustandsübergangsbedingungen spielen die Wahrnehmungsgrenzen der Differenzgeschwindigkeit  $v_{\text{diff}}$  eine wichtige Rolle. Für die Wahrnehmung der Differenzgeschwindigkeit existiert eine Schwelle  $v_{\text{diff,min}}$ , die durch Wiedemann'sche Formel be-

rechnet werden kann [5]. Todosiev [4] zeigt zusätzlich die Abhängigkeit der Wahrnehmung der Relativgeschwindigkeit vom relativen Abstand und Beobachtungszeit. Er zeigt, dass entsprechend der Wiedemann'schen Formel die Schwelle für die Wahrnehmung der relativen Geschwindigkeit bei größeren Abständen steigt.

In einer zweiten Funktion werden die Veränderungen des Gas- und Bremspedals durch den Fahrer bewertet. Anhand der Bedienung des Gas- und Bremspedals und in Abhängigkeit von den erwarteten Reaktionen bei den potentiell gefährlichen Situationen wird in der dritten Funktion entschieden, ob der Fahrzeugführer aufmerksam oder unaufmerksam ist. Für die Verkehrssituationen, in denen keine bestimmte Reaktion des Fahrzeugführers erwartet wird, wird der Aufmerksamkeitszustand als ‚unbestimmt‘ definiert.

## **6.4 Experiment: Hauptversuch**

### **Aufbau und Ablauf**

Dieser zweite Simulatorversuch wurde durchgeführt, um herauszufinden in wie weit der Schätzer die Aufmerksamkeit der VP richtig erkennen kann und ob durch dessen Einsatz eine Verbesserung des Warnsystems erreicht werden kann.

15 VP absolvierten auf einer simulierten Autobahnstrecke drei verschiedene Fahrtrunden, wobei jede Fahrt ungefähr 20 Minuten dauerte. Vier Kameras zeichneten die Fahrscene, den Fahrer, den Fußraum und die Bedienung der Komfortsysteme auf. In der zweiten Runde liefen das Kollisionswarnsystem und der Aufmerksamkeitsschätzer im Hintergrund. Die implementierten Events bestanden aus AS und FBS (siehe Vorversuch). Die VP wurden teilweise durch eine Nebenaufgabe zusätzlich belastet. Die Nebenaufgabe bestand in der Bedienung von Komfort- und Kommunikationseinrichtungen wie Klimaautomatik, Navigationssystem, Radio, Bordcomputer. Über einen Controller ließen sich diese Funktionen mit einer Hand bedienen. Für die Erfüllung der Nebenaufgaben waren Blickabwendungen von der Fahrscene notwendig.

In der dritten Runde wurde das Kollisionswarnsystem aktiviert, und die Warnungen wurden ausgegeben.

Bei dem Warnsystem handelt es sich um ein dreistufiges System, dessen Warnstufen abhängig von der Gefährlichkeit der Situation ausgegeben werden. Die Warnstufen bestehen aus drei optischen Warnsymbolen, die in der Reihenfolge gelb, orange, rot auf der Tacho-Anzeige erscheinen. Ein akustisches Signal wird gleichzeitig mit der dritten optischen Stufe (rot) ausgegeben und ist das stärkste Warnsignal. Die Ausgabe jeder Warnstufe erfolgt bei der Unterschreitung einer bestimmten, vordefinierten Zeitreserveschwelle.

Nach der Fahrt mussten die Probanden einen Fragebogen ausfüllen, in dem das Warnsystem bewertet werden sollte.

### **Ergebnis**

Bei Event III (FBS mit  $a_f = -2,5 \text{ m/s}^2$  ohne Nebenaufgabe) wurde der Aufmerksamkeitszustand während der zweiten Versuchsfahrt (ohne aktives Warnsystem) zu 66,7 % richtig erkannt. In 33,3 % der Fälle, bei denen der Aufmerksamkeitsschätzer den Zustand ‚Abgelenkt‘ hat, waren die VP nicht unaufmerksam, sondern hatten aus anderen Gründen später als innerhalb der erwarteten mittleren Reaktionszeit reagiert. Die lange Reaktionszeit lag vor allem daran, dass drei der VP vor dem Beginn des Events bereits eine kleinere Geschwindigkeit als die vorgegebene Zielgeschwindigkeit und damit einen größeren Abstand zum Vorderfahrzeug hatten und daher nicht schnell auf die Verzögerung des Vorderfahrzeugs reagieren mussten. Dies muss in der weiteren Entwicklung des AMS berücksichtigt werden. Insgesamt lag die Trefferquote des Schätzers während der beiden Versuchsfahrten für Event III bei 70 %.

Während der zweiten Versuchsfahrt (ohne aktives Warnsystem) im Event V (FBS mit  $a_f = -4,5 \text{ m/s}^2$ ) lag die Trefferquote des Schätzers bei ungefähr 73,3 %. Diese Rate liegt bei der

dritten Fahrt bei 78,6 %. Insgesamt ist die Trefferquote der Abschätzung 75,9 %. In der Tabelle 6.1 sind die richtigen Schätzungen in den grauen Feldern zu sehen.

Bei Event VI (FBS mit  $a_f = -5,5 \text{ m/s}^2$ ) liegt die Quote der richtigen Einschätzungen des Aufmerksamkeitsschätzers in der zweiten Versuchsfahrt bei 85,7 % und bei dem dritten Lauf bei 86,7 %. Insgesamt liegt diese Quote bei 86,2 %.

	Ablenkung	Geschätzte Aufmerksamkeit	
		Abgelenkt	Nicht Abgelenkt
Event V (FBS mit $a_f = -4,5 \text{ m/s}^2$ )	Abgelenkt	62,1 %	13,8 %
	Nicht Abgelenkt	10,3 %	13,8 %

Tabelle 6.1: Trefferquote des AMS in Event V

Man kann sehen, dass je stärker die Verzögerung des Vorderfahrzeugs ist, desto höher die Trefferquote der Einschätzungen wird. Dies liegt daran, dass die stärkeren Verzögerungen die Situationen kritischer machen (siehe Vorversuch). Dadurch ist es eher unwahrscheinlich, dass ein aufmerksamer Fahrzeugführer später als die ausgerechnete Reaktionszeit auf das Geschehnis reagiert.

Neben der Frage der Trefferquote des Schätzers stellt sich zusätzlich eine andere Frage: Kann der richtig eingeschätzte Aufmerksamkeitszustand zur höheren Effizienz des Kollisionswarnsystems beitragen? Findet diese Zustandserkennung so schnell statt, dass im Falle der ‚Unaufmerksamkeit‘ die Warnungen früher und im Falle der ‚Aufmerksamkeit‘ die Warnungen später oder gar nicht herausgegeben werden?

Bei Event IV und Event V (beide FBS mit  $a_f = -4,5 \text{ m/s}^2$ ) wird die Entscheidung über den Aufmerksamkeitszustand nach 0,9 s getroffen. Die erste und zweite Warnstufe wird aber durchschnittlich 0,7 s bzw. 0,4 s vor dieser Entscheidung herausgegeben. Deswegen ist eine Verbesserung des Warnsystems auf der Stufe der optischen Warnungen nicht erreichbar. Die dritte Stufe, also der Warn Gong, findet erst 0,6 s nach der Entscheidung über den Aufmerksamkeitszustand statt. Dadurch kann durch eine höhere Warnschwelle für den Warn Gong die Warnausgabe um ungefähr 0,4 s früher aktiviert werden.

Bei Event VI ( $a_f = -5,5 \text{ m/s}^2$ ) fällt die Zeitreserve so steil ab, dass sogar die dritte Warnstufe nur um 0,2 s optimiert werden kann.

Der Einsatz des Aufmerksamkeitsschätzers würde neben der Erhöhung der Effizienz auch die Kundenakzeptanz des Kollisionswarnsystems verbessern. Diese Aussage beruht auf der Auswertung der Fragebögen, die nach der Durchführung der Versuche von den VP ausgefüllt worden sind.

Zu beurteilen war das Kollisionswarnsystem insgesamt, die optische Warnung und der Warn Gong nach dem eigenen Empfinden. Bei der Frage, ob die optischen Warnsignale zu spät oder zu früh erschienen sind, lag der Mittelpunkt der Bewertungen in einer Skala von -3 für sehr früh bis +3 als sehr spät bei 0,2. Dies bedeutet, dass die VP insgesamt den Zeitpunkt der Erscheinung der optischen Warnung als geeignet empfunden haben. Anders als bei den optischen Warnungen sieht es bei dem Zeitpunkt des Auftretens der akustischen Warnung aus. Der Mittelpunkt der Bewertung durch die VP liegt bei 0,8 mit einer Standardabweichung von 0,8. Die VP haben also den Zeitpunkt der Ausgabe des Gongs als eher spät empfunden. Diese Ergebnisse verstärken die Annahme, dass der Einsatz des Aufmerksamkeitsschätzers die Akzeptanz des Kollisionswarnsystems erhöht, weil, wie bereits dargestellt, dadurch gerade die dritte Warnstufe, also die akustische Warnung, abhängig vom Aufmerksamkeitszustand früher ausgelöst werden kann.

## 6.5 Zusammenfassung

Die Warnschwellen eines Kollisionswarnsystems sollen durch den momentanen Aufmerksamkeitszustand des Fahrers so optimiert werden, dass bei ‚Unaufmerksamkeit‘ die Warnungen früher ausgegeben werden.

Es wurde dargestellt, dass die Einbindung des Menschen als in der Entwicklung des Auffahrwarnsystems, die mit dem Fahrzeugführer interagieren, unverzichtbar ist: Ein Warnsystem kann nur dann eine hohe Kundenakzeptanz erreichen, wenn es die ausschlaggebenden Faktoren des Fahrerzustands berücksichtigt.

Die Ergebnisse aus dem Vorversuch lieferten Erkenntnisse über die Reaktionen der VP in Auffahr- und Folge/Bremssituationen. Sie zeigten, wie die VP ihr Fahrverhalten durch eine Nebenaufgabe verändert hatten. Es konnte gezeigt werden, dass es in manchen Fahrsituationen möglich ist, durch die Bedienung des Gas- und Bremspedals Informationen über den Aufmerksamkeitszustand des Fahrzeugführers zu gewinnen. Diese Daten wurden genutzt, um einen Aufmerksamkeitsschätzer zu entwickeln. Anschließend wurde die Anwendung des Aufmerksamkeitsschätzers zur Optimierung eines Kollisionswarnsystems beschrieben. Es wurde gezeigt, dass der Aufmerksamkeitsschätzer allein durch die Informationen, die ihm durch Gas- und Bremspedal zur Verfügung gestellt werden, den Aufmerksamkeitszustand des Fahrers meist richtig erkennen kann. Der Vergleich der Bewertung der Warnsignale durch VP mit dem Zeitpunkt der Erkennung des Aufmerksamkeitszustands hat gezeigt, dass die akustische Warnausgabe abhängig von der geschätzten Aufmerksamkeit optimiert werden kann.

## Literaturverzeichnis

- [1] Clarke, N., Hayward M.: Exploitation Plan and Technology Implementation Report, Project Anti-Collision Assist, Project Deliverable D11.2, European Commission, DG XIII, oder: Becker, S., Mihm, J., Hofmann, O. e.a., Projektberichte AC-ASSIST, TÜV Rheinland, Köln, 1996 -1999
- [2] Gstalter, H.: Der Verkehrskonflikt als Kenngröße zur Beurteilung von Verkehrsabläufen und Verkehrsanlagen. Dissertation, TU Braunschweig, 1982
- [3] Kopf, M.: „Ein Beitrag zur modellbasierten, adaptiven Fahrerunterstützung für das Fahren auf deutschen Autobahnen“, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Nr. 203 Düsseldorf: VDI- Verlag, (1994).
- [4] Todosiev, E. P. : „The Action-Point model of the Driver-Vehicle System ”, Ph.D. Dissertation, Ohio State University, (1963).
- [5] Wiedemann, R.: „Simulation des Straßenverkehrsflusses“, Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, Heft 8, (1974).
- [6] Zimmer, R.: „Fahrer-Assistenz versus Fahrer-Bevormundung: Wie erreicht man, dass der Fahrer Herr der Situation bleibt?“, in: Kraftfahrzeugführung, Hrsg. Th. Jürgensohn, K.-P. Timpe, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, (2001).