Entwicklung und Evaluation eines manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenten

Dem Fachbereich Maschinenbau der
Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
eingereichte

Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Stefan Habenicht
aus Helmstedt

Erstreferent: Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Ralph Bruder

Tag der Einreichung: 12.03.2012

Tag der mündlichen Prüfung: 09.05.2012

Roßdorf 2012

D 17

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter des Fachgebiets Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt.

Ich danke herzlich Herrn Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner, dem Leiter des Fachgebiets Fahrzeugtechnik, der mit kritischen Diskussionen, großen Freiräumen und Vertrauen in meine Fähigkeiten zum Gelingen der Arbeit sowie zur Entwicklung meiner Person beigetragen hat.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Ralph Bruder, Leiter des Instituts für Arbeitswissenschaften der Technischen Universität Darmstadt, danke ich für die freundliche Übernahme des Korreferats.

Sämtlichen aktuellen und ehemaligen Mitarbeitern des Fachgebiets Fahrzeugtechnik gilt weiterhin mein Dank für die vielfältige Unterstützung. Meine Tätigkeit hat mir viel Freude bereitet und ich bin glücklich, dass viele Kollegen zu Freunden wurden. So begleiten mich auch nach meiner Zeit als wissenschaftliche Mitarbeiter viele persönliche Erinnerungen.

Weiterhin bedanke ich mich bei den zahlreichen Studenten, die mich tatkräftig bei meiner Forschungsarbeit unterstützt haben.

Meinen Eltern und Großeltern bin ich für ihre bedingungslose Unterstützung und bewundernswerte Aufopferungsbereitschaft während meiner gesamten Ausbildung sehr dankbar. Auch wenn Ihnen die Inhalte der Arbeit nicht in allen Details geläufig sein mögen, so haben sie doch einen sehr großen Anteil zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Meiner Frau danke ich für Ihren liebevollen Zuspruch, ihre Unterstützung und ihr nahezu grenzenloses Verständnis in den letzten Jahren. Vielen lieben Dank.

Roßdorf, im Februar 2012 Stefan Habenicht

Meiner Familie

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen ..... **VII**

Formelzeichen und Indizes ..... **VIII**

1 Einleitung **1**
1.1 Ausgangslage und Motivation 1
1.2 Zielsetzung 3
1.3 Methodik und Aufbau der Arbeit 3

2 Manöverbasierte Fahrstreifenwechselassistenz **5**
2.1 Menschlicher Informationsverarbeitungsprozess der Fahrzeugführung 5
2.2 Klassifizierung von Assistenzsystemen 7
2.3 Einordnung der manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenz 9

3 Stand der Forschung und Technik **11**
3.1 Lane Change Decision Aid Systems 11
3.2 Kombinierte Assistenzsysteme 13
3.3 Manöverbasierte Fahrzeugführung und Assistenz 15
3.4 Human Machine Interface 17
3.5 Fazit des Stands der Forschung und Technik 18

4 Konzeption des manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenzsystems **19**
4.1 Fahrstreifenwechselanalyse und Anforderungsdefinition 19
4.1.1 Zeitlicher Ablauf des Fahrstreifenwechsels 19
4.1.2 Fahrstreifenwechselszenarien und -alternativen 20
4.2 Manöverempfehlung 21
4.3 Fahrstreifenwechsel-Vorsteuerprogramme 25

5 Entwicklung des manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenzsystems **28**
5.1 Funktionale Systemarchitektur 28
5.2 Fahralternativenbewertung 30
5.2.1 Zielsetzung, Vorgehen und Stand der Technik 30
5.2.2 Sicherheitskriterium 33
5.2.3 Situationsanalyse 45
5.2.4 Fahrstreifenwechselprädiktion 50
5.3 Fahrerabsichtsdetektion 57
5.3.1 Anforderungen und Zielsetzung 57
5.3.2 Modulstruktur 58
5.4 HMI: Display 61

5.5 Versuchsträgerintegration 66

6 Evaluation des manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenten 68
6.1 Lane Change Decision Aid System 68
6.2 Probandenkollektiv 69
6.3 Versuchsablauf 72
6.4 Subjektiver Systemeindruck 76
6.5 Fahrerbeanspruchung 78
6.5.1 Belastung und Beanspruchung 78
6.5.2 Methoden zur Erfassung der Fahrerbeanspruchung 78
6.5.3 Resultate Task Load Index 80
6.5.4 Resultate Nebenaufgabenleistung 84
6.5.5 Fazit Beanspruchungsmessung 89
6.6 Sicherheitsbewertung 91
6.6.1 Kritikalitätsmaß 91
6.6.2 Auswertungszeitraum 93
6.6.3 Resultate Sicherheitsbewertung 94
6.6.4 Sensitivitätsanalyse des Kritikalitätsmaßes 99
6.6.5 Fazit Sicherheitsbewertung 99
6.7 Vergleich Sicherheit und Fahrerbeanspruchung 99

7 Zusammenfassung und Ausblick 101

8 Anhang 103
8.1 Szenarienkatalog und Elementarszenarien 103
8.2 Probandenkollektiv 106
8.3 TLX-Auswertung 107
8.4 Auswertung der Nebenaufgabenleistung 110
8.5 Sicherheitsbewertung 111

Literaturverzeichnis 112

Eigene Veröffentlichungen 122

Betreute studentische Arbeiten 123

Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
AARU	Audi Accident Research Unit
ACC	Adaptive Cruise Control
AGB	Aktive Gefahrenbremsung
AKTIV	Adaptive und Kooperative Technologien für Intelligenten Verkehr
CAN	Controller Area Network
CbW	Conduct-by-Wire
CMBS	Collision Mitigation Brake System
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
GIDAS	German In-Depth Accident Study
FAS	Fahrerassistenzsysteme
FS	Fahrstreifen
FSWA	Manöverbasierter Fahrstreifenwechselassistent
HAVEit	Highly Automated Vehicles for Intelligent Transport
HMI	Human Machine Interface
INVENT	Intelligenter Verkehr und nutzergerechte Technik
LCA	Lateral Collision Avoidance
LCD	Liquid Crystal Display
LCDAS	Lane Change Decision Aid Systems
LDW	Lane Departure Warning
LKAS	Lane Keeping Assist System
MOBIL	Minimizing Overall Braking Deceleration by Lane Changes
NA	Nebenaufgabe
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration
PROMETHEUS	Programme for a European Traffic of Highest Efficiency and Unprecedented Safety
StVO	Straßenverkehrsordnung
TTC	Time-to-Collision
TLC	Time-to-Line Crossing
TLX	Task Load Index
VIAC	VisLab Intercontinental Autonomous Challenge

Formelzeichen und Indizes

Symbol	Einheit	Beschreibung
a	m/s²	Beschleunigung
d	m	Abstand
D	m/s²	Verzögerung
n	-	Anzahl
p	-	Signifikanzniveau
s	m	Weg
TTC	s	Time-to-Collision
t	s	Zeit
T	s	Wechseldauer
v	m/s	Geschwindigkeit
x	m	Position in Bezug zum EGO-Fahrzeug-Koordinatensystem
$\overline{X}$	diverse	Mittelwert
σ	diverse	Standardabweichung
τ	s	Zeitdauer

Index	Beschreibung
0	Anfangsbedingung
I	vorausfahrendes Fahrzeug auf Zielfahrstreifen
II	nachfolgendes Fahrzeug auf Zielfahrstreifen
III	vorausfahrendes Fahrzeug auf Startfahrstreifen
$charged$	zugemutet
B	Bremsen
EGO	EGO-Fahrzeug
GAP	Lücke
R	Reaktion
$react$	verfügbare Reaktion
$reasonable$	zugemutet
rel	relativ
req	erforderlich
S	Sicherheit

1 Einleitung

Ausgehend von der Motivation, die auf Unfalldatenanalysen, Fahrerbefragungen und Beanspruchungsbewertungen beruht, werden die Zielsetzungen hinsichtlich der Entwicklung und Evaluation eines manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenten und die methodische Vorgehensweise im ersten, einleitenden Kapitel erläutert.

1.1 Ausgangslage und Motivation

Im Jahre 2010 ereigneten sich auf deutschen Autobahnen 18.829 Unfälle mit Personenschaden, dabei verunglückten 29.303 Menschen. 13 % der Unfälle waren laut Statistischem Bundesamt Zusammenstöße mit einem anderen Fahrzeug, das seitlich in gleicher Richtung fuhr.[1] Nach einer Analyse der German In-Depth Accident Study (GIDAS) Daten von 1985 bis 1999 erfolgten durchschnittlich mehr als 5 % der Unfälle während eines Fahrstreifenwechsels.[2] Eine aktuellere Auswertung der GIDAS Datenbank mit Stand 2003 zeigt, dass Fahrstreifenwechselunfälle sogar 7 % aller Autobahnunfälle ausmachen.[3]

Dies wird durch die große Beanspruchung des Fahrers[4] während eines Fahrstreifenwechselmanövers verursacht, das laut Henning[5] „hohe kognitive und motorische Ansprüche“ an den Fahrer stellt. Der Fahrer muss mehrere Aufgaben zeitgleich erfüllen. So muss er die Längs- und Querdynamik regeln und die Fahrzeuge auf mehreren Fahrstreifen vor, neben und hinter sich beobachten.[6,7] Meist werden diese Unfälle durch Perzeptionsfehler verursacht. Die Geschwindigkeiten und Abstände anderer Fahrzeuge werden häufig falsch eingeschätzt oder andere Fahrzeuge werden gar nicht wahrgenommen.[8,9,10]

---

[1] Statistisches Bundesamt: Verkehrsunfälle 2010, 2011, S. 49 und 65

[2] Bartels et al.: FAS-Handbuch: Fahrstreifenwechselassistenz, 2009, S. 562

[3] Mann: Entwicklung eines Querführungsassistenten, 2008, S. 68

[4] Fahrer wird als generisches Maskulinum verwendet. Beide Geschlechter sind gleichbedeutend.

[5] Henning; Matthias Johannes: Preparation for Lane Changing, 2010, S. 1

[6] Friedrichs et al.: Erprobung von Fahrerassistenzsystemen, 2005, S. 49

[7] Kölbl et al.: Quer- und Längsregler zur Fahrzeugführung, 2006, S. 2

[8] Roelofsen et al.: Lane Change Assistance, 2010, nach Hashimoto, Masahiro et al.: Driver Model for Lane Change Judgement, 2001

[9] Knipling: IVHS Collision Avoidance, 1993, S. 13

Die große Beanspruchung durch Fahrstreifenwechselmanöver spiegelt sich auch in Umfragen wieder. So sehen 82 % aller Befragten einen (großen) Bedarf für einen Totwinkel-Assistenten[11] und laut VDI-Nachrichten[12] haben die US-Marktforscher von J. D. Power ein Interesse von drei Viertel aller Befragten für dieses System ermittelt.

Erschwerend kommen für den Fahrer die zum Teil sehr hohen Differenzgeschwindigkeiten auf deutschen Autobahnen, zeitweise schlechte Sichtbedingungen und das steigende Verkehrsaufkommen hinzu.

Aus diesem Grund bieten viele Fahrzeughersteller Fahrstreifenwechselwarnsysteme an. Diese sind in der ISO-Norm 17387[13] beschrieben und werden als Lane Change Decision Aid Systems (LCDAS) bezeichnet. Sie informieren den Fahrer über Fahrzeuge im toten Winkel und, je nach Hersteller und Systemtyp, vor sich von hinten nähernden Fahrzeugen. Darüber hinaus warnen sie den Fahrer, wenn ein Fahrstreifenwechsel z.B. durch Setzen des Fahrtrichtungsanzeigers signalisiert wird, optisch mittels Symbol im Außenspiegel oder im Spiegelfuß bzw. in der A-Säule, akustisch mittels Warnton oder haptisch mittels Lenkradvibration. Diese Systeme sind in Kapitel 3.1 LCDAS detaillierter beschrieben. Ein LCDAS kann die Situation entschärfen, indem es die mangelnde Wahrnehmung des Fahrers adressiert[14] und ihn auf die Fahrzeuge auf dem benachbarten Fahrstreifen hinweist. Sein Wechselwunsch wird nach der Deeskalation der Situation weiter bestehen und er bekommt vom LCDAS keine Verhaltensweisen empfohlen, die ihm einen Wechsel erleichtern.

Nur wenige Forschungsprojekte haben sich mit der integrierten Assistenz mehrerer Fahrstreifenwechselaufgaben beschäftigt. Eine Kombination von Lane Departure Warning (LDW), Lane Keeping Assistance System (LKAS) und LCDAS wurde von Kölbl[15] vorgestellt. Das Warnsystem wurde durch eine haptische Lenkradmomentenempfehlung ergänzt.[16] Weitere Ansätze zur manöverbasierten Assistenz sind im Kapitel 3 Stand der Forschung und Technik beschrieben.

Obwohl die benannten Systeme mehr als nur eine singuläre Aufgabe bei der Durchführung eines Fahrstreifenwechselmanövers unterstützen, adressieren sie nicht das gesamte Manöver von der Intentionsbildung bis zur Durchführung. Die Phase der Entstehung des Fahrstreifenwechselwunsches wird dabei als Intentionsbildung bezeichnet. Des Weiteren empfehlen sie nicht die Durchführung von Fahrstreifenwechseln, sobald die

---

[10] Gründl: Fehler als Ursache von Verkehrsunfällen, 2005, S. 238

[11] van Arem et al.: Investigation of user needs, 2005, S. 305

[12] VDI: VDI Umfrage, 2002

[13] International Organization for Standardization: ISO 17387: LCDAS, 2008

[14] Henning: Preparation for Lane Changing, 2010, S. 93

[15] Kölbl et al.: Quer- und Längsregler zur Fahrzeugführung, 2006

[16] von der Beeck: Logical and Technical Automotive Architectures, 2006

Absicht des Fahrers detektiert ist. Weiterhin sind die Ansätze nicht fahrerfokussiert und somit erfolgt die Entwicklung nicht Top-Down, sondern ist durch die technischen Möglichkeiten motiviert. Der Fahrer wird lediglich auf der Perzeptionsebene assistiert. Die Kognition wird nicht unterstützt und so muss der Fahrer weiterhin aus den gegebenen Informationen seine Verhaltensweise ableiten und beispielsweise seine Längsdynamik eigenständig regeln. Eine Vorgabe zum optimalen, längsdynamischen Verhalten wird nicht gegeben.

1.2 Zielsetzung

Die Analysen der Unfalldatenbanken sowohl des Statistischen Bundesamtes als auch der GIDAS und die Fahrerbefragungen zeigen den Unterstützungsbedarf des Fahrers beim Fahrstreifenwechsel. Aus diesem Grund ist das Ziel der vorliegenden Arbeit die Entwicklung und Realisierung eines manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenzsystems, das den Fahrer von der Intentionsbildung bis zur Wechseldurchführung bei den teilweise parallelen Aufgaben eines Fahrstreifenwechselmanövers unterstützt, ohne die Fahrzeugführung zu automatisieren. Dabei zielt das System auf eine Verbesserung von Komfort, Beanspruchung und Sicherheit des Fahrers ab. Ein Assistenzkonzept, das die vom Fahrer benötigten Informationen und Empfehlungen beschreibt, ist das erste Teilziel. In der zweiten Phase soll basierend auf dem konzeptionellen Entwurf der manöverbasierte Fahrstreifenwechselassistent entwickelt werden. Dieser Abschnitt wird mit der Integration des Systems in ein Prototypfahrzeug abgeschlossen. Dazu zählt neben der softwaretechnischen Realsierung auch die erforderliche Hardware zur Umfelderfassung und zur Mensch-Maschine Interaktion. Das Ziel der abschließenden Phase ist die Validierung des Systems in Fahrversuchen mit Probanden, um die Fahrerbeanspruchung, die Sicherheit sowie den Komfortgewinn zu beurteilen.

1.3 Methodik und Aufbau der Arbeit

Die fahrerfokussierte Vorgehensweise, die in Abbildung 1-1 dargestellt ist, basiert auf der Frage: Welcher Informationen bedarf der Fahrer bei der Fahrstreifenwechseldurchführung? Um diese Informationen in der Manöverempfehlung zusammenzufassen, wird der Fahrstreifenwechsel analysiert.

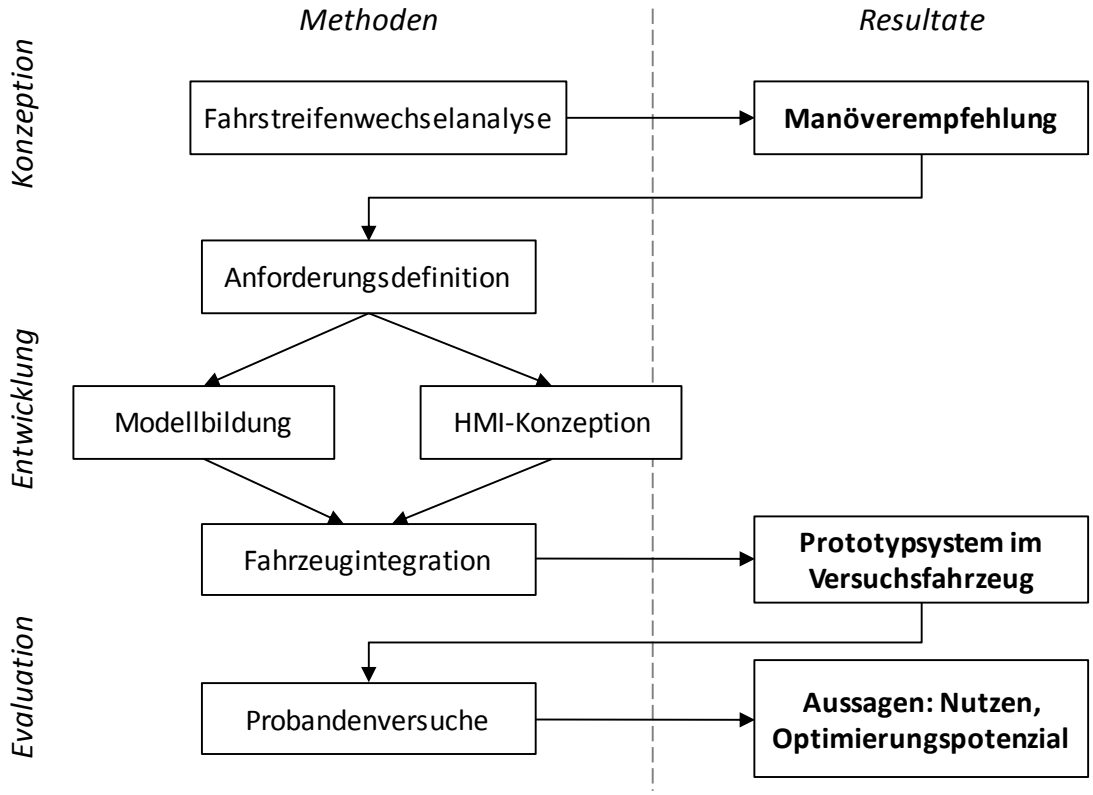


Abbildung 1-1: Methodische Vorgehensweise zur Entwicklung und Evaluation

Kapitel 2 und 3 ordnen die manöverbasierte Fahrstreifenwechselassistenz in die Fahrerassistenzsysteme ein und dokumentieren den Stand der Technik. Die Analyse des Fahrstreifenwechselmanövers sowie die Manöverempfehlung sind in Kapitel 4 Konzeption des manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenzsystems beschrieben. Durch systematisches Kombinieren der Variationsparameter eines Fahrstreifenwechsels, die aus der Recherche von Richtlinien und aus der Anwendung von Kreativmethoden bekannt sind, wird ein Szenarienkatalog erstellt und die Fahralternativen sowie die erforderlichen Informationen werden abgeleitet. Die Systemarchitektur des Modells entsteht durch funktionale Aggregation der Gesamtsystemanforderungen und spezifiziert die Module des Systems. Dies sind im Wesentlichen das Modul zur Fahralternativenbewertung, dokumentiert in Kapitel 5.2, und das Modul der Fahrerabsichtsdetektion, das in Kapitel 5.3 beschrieben wird. Neben dem Systemmodell wird das zu entwickelnde Human Machine Interface (HMI) in das Versuchsfahrzeug mit entsprechender Umfeldsensorik integriert. Zur Evaluation des Systems werden Probandenversuche auf einem Testgelände durchgeführt. Als Referenzen dienen Fahrten ohne System und mit einem LCDAS. Die Evaluation ist in Kapitel 6 dokumentiert.

2 Manöverbasierte Fahrstreifenwechsel-assistenz

In diesem Kapitel werden zunächst grundlegende Fahrermodelle erläutert. Bestehende Assistenzsysteme werden auf die Modelle angewendet und ein eigenes Fahrerverhaltensmodell für das manöverbasierte Fahrstreifenwechseln wird abgeleitet.

2.1 Menschlicher Informationsverarbeitungsprozess der Fahrzeugführung

Zahlreiche Fahrermodelle zur Beschreibung des Verhaltens während der Ausführung der Fahraufgabe sind aus der Literatur bekannt.[17] Zwei bekannte, grundlegende Betrachtungen werden nachfolgend beschrieben, da sie die Basis für das Modell des manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenten bilden.

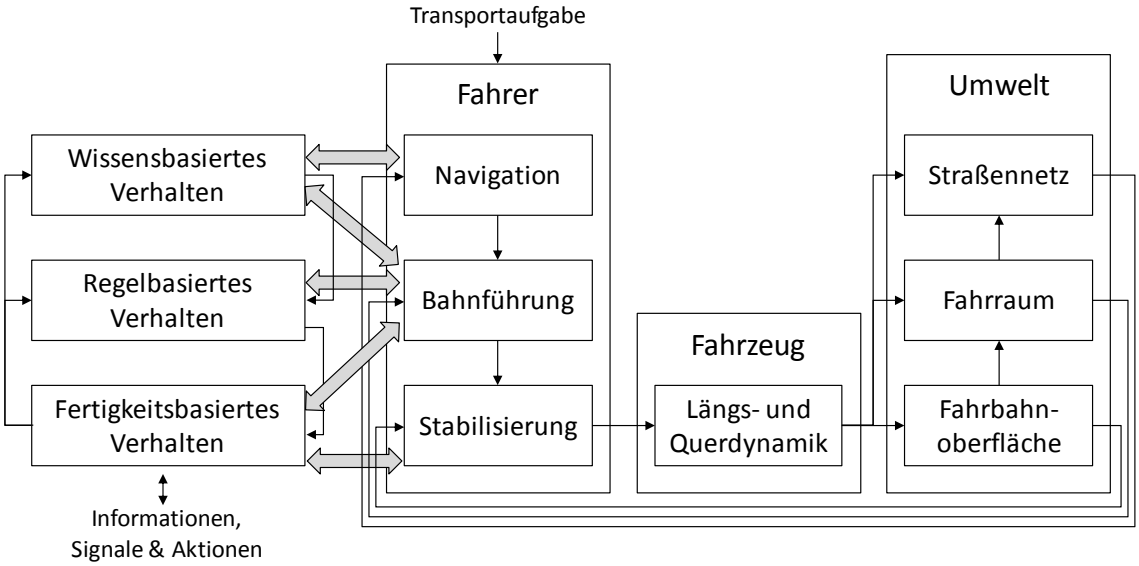


Abbildung 2-1: 3-Ebenen-Modell nach Rasmussen und Donges[18]

Rasmussen[19] stellte 1983 ein auf drei Kategorien kognitiver Beanspruchung beruhendes Modell für zielgerichtete Tätigkeiten vor. Diese sind in Abbildung 2-1 links dargestellt.

[17] Eine Übersicht bieten z.B. Abendroth: Abstandsregelsystem, 2001, S.9 – 22 und Willumeit et al.: Fahrermodelle - ein kritischer Überblick, 1997

[18] Donges: Fahrerverhaltensmodelle, 2009, S. 15, basierend auf Donges: Aspekte der aktiven Sicherheit, 1982, und Rasmussen: Skills, Rules, and Knowledge, 1983

Danach werden Tätigkeiten auf der untersten Ebene des *fertigkeitsbasierten* Handelns intuitiv, ohne bewusste Aufmerksamkeitszuwendung, als reflexartige Reaktion auf einen äußeren Reiz ausgeführt. Aus den auf Basis von früheren Erfahrungen verfügbaren Verhaltensregeln wählt der Mensch auf der zweiten, *regelbasierten* Ebene eine Handlung aus und führt diese durch. In unbekannten, anspruchsvollen Situationen, die dem Menschen untrainierte Handlungsmuster abfordern, prüft der Mensch auf der Ebene des *wissensbasierten* Verhaltens mehrere Alternativen auf ihre Durchführbarkeit, wählt eine aus und speichert diese eventuell als Regel im Rahmen des *regelbasierten* Verhaltens für eine spätere Verwendung.

Donges beschrieb 1982 erstmals die Fahraufgabe in einem hierarchischen Modell mit drei Ebenen, das in Abbildung 2-1 rechts dargestellt ist. Die langfristigste Ebene der *Navigation* umfasst die Planung einer Route inklusive einer zeitlichen Abschätzung und ggf. eine Umgestaltung der Route bei Störungen, z.B. Baustellen oder Verkehrsstau. Der Fahrer leitet aus der gewählten Fahrtroute unter Berücksichtigung der Verkehrssituation, den eigenen Wünschen und den rechtlichen Rahmenbedingungen auf der *Bahnführungsebene* die Führungsgrößen wie z.B. den Sollfahrstreifen und die Sollgeschwindigkeit ab und steuert das Fahrzeug. Auf der *Stabilisierungsebene* regelt der Fahrer über das HMI die physikalische Eigenbewegung des Fahrzeugs in Längs- und Querrichtung und reduziert die Regelabweichungen. Ob das Fahrerverhalten zur Navigation, Bahnführung und Stabilisierung wissens-, regel- oder fertigkeitsbasiert abläuft, ist im Wesentlichen von der individuellen Erfahrung des Fahrers abhängig.

In Anlehnung an das Modell zur Fehleranalyse von Rasmussen[20] entwickelten die Audi Accident Research Unit (AARU), die GIDAS und die Volkswagen Unfallforschung gemeinsam die 5-Step-Methode zur Fehlerklassifikation.[21] Abbildung 2-2 zeigt rechts die fünfstufige Methode, die sich in das einfache, sequentielle Modell der menschlichen Informationsverarbeitung als eine Folge von Perzeption, Kognition und Aktion einfügt. Die fünf Stufen sind der Informationszugang, die Informationsaufnahme, die Informationsverarbeitung, die Zielsetzung und die Ausführung.

---

[19] Rasmussen: Skills, Rules, and Knowledge, 1983

[20] Rasmussen: Human Errors, 1982

[21] Graab et al.: Analyse der AARU von Verkehrsunfällen, 2008

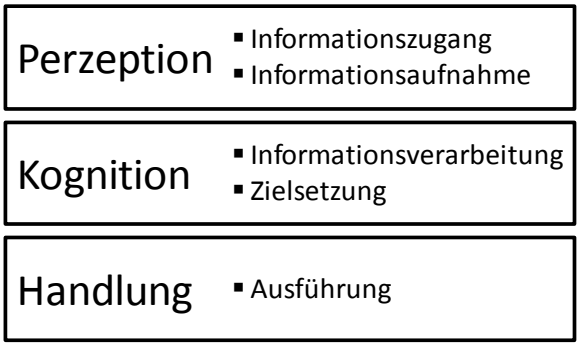


Abbildung 2-2: Menschliche Informationsverarbeitung nach Graab[22]

Nachfolgend werden die bestehenden Assistenzsysteme anhand der beschriebenen Fahrermodelle klassifiziert, und basierend auf den Modellen wird ein Fahrerverhaltensmodell für den manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenten abgeleitet.

2.2 Klassifizierung von Assistenzsystemen

Vollautonome Fahrzeugsysteme werden seit langer Zeit erforscht. In den letzten Jahren wurden große Fortschritte in der Umfeldinterpretation, der Eigenpositionierung und der Fahrregelung erzielt. Dies wurde in Wettbewerben wie der DARPA Urban Challenge[23] und mit Demonstrationen, wie der autonomen Fahrt eines Audi TTS quattro auf teilweise losem Grund auf den Pike's Peak im Jahr 2010, und Projekten wie dem Braunschweiger Stadtpilot[24], dem italienischen VIAC[25], dem Google Self-Driving-Car[26] und dem Berliner AutoNOMOS eindrucksvoll bewiesen. Neben den technischen Herausforderungen sind noch zahlreiche Fragen hinsichtlich der Akzeptanz der Nutzer, der Situation und Mode Awareness bei unvollständiger Situationsabdeckung[27], und der funktionalen Freigabe[28], sowie der ethischen Freigabe hinsichtlich des akzeptablen Fehlers bzw. des zulässigen Grenzrisikos offen.

Während vollautonome Systeme alle drei Ebenen: die Perzeption, die Kognition und die Handlung vollständig für den Fahrer übernehmen, wird er durch teilautomatisierte Systeme, wie z.B. Conduct-by-Wire (CbW)[29,30], auf allen drei Ebenen unterstützt.

---

[22] Graab et al.: Analyse der AARU von Verkehrsunfällen, 2008, S. 8

[23] Berger et al.: Autonomes Fahren – Erkenntnisse , 2008

[24] Saust et al.: Braunschweiger Stadtpilot, 2011

[25] Bertozzi et al.: VIAC - Autonomous Driving, 2011

[26] Kirkpatrick: Google's Self Driving Cars, 2010

[27] Hakuli et al.: Handbuch FAS: Kooperative Automation, 2009, S. 647

[28] Winner et al.: Freigabefalle des autonomen Fahrens, 2011

[29] Winner et al.: Conduct-by-Wire, 2006

Die LCDAS assistieren den Fahrer durch Informationen und Warnungen auf der Perzeptionsebene. Je nach Systemausprägung werden die Fahrzeugbewegungen prädiziert und so ein Übergang zur Informationsverarbeitung auf der Ebene der Kognition geschaffen. Allerdings wird keine Zielsetzung abgeleitet oder eine Entscheidung getroffen, die eine umfassende Entlastung des Fahrers auf der Ebene der Kognition bewirkt. Das LCDAS kann gefährliche Fahrstreifenwechsel und somit riskante Folgesituationen vermeiden. Nichtsdestotrotz befindet sich der Fahrer weiterhin auf dem Startfahrstreifen, ist evtl. nicht in der Lage seine Fahrweise anzupassen, um z.B. die Geschwindigkeit mit dem Zielfahrstreifen zu synchronisieren, und sein Wunsch nach einem Fahrstreifenwechsel wird weiterhin bestehen. In dieser Situation würde ihm vermutlich eine Fahrempfehlung die Durchführung des Fahrstreifenwechsels erleichtern. Ein entsprechender manöverbasierter Fahrstreifenwechselassistent unterstützt den Fahrer folglich auf der Perzeptions- und auf der Kognitionsebene. Die Handlungsebene wird nicht adressiert, da laut Abendroth et al.: „die physische Belastung im Sinne einer arbeitsphysiologisch zu leistenden Arbeit im Vergleich zu den sich aus der Informationsaufnahme und -verarbeitung ergebenden Belastungen gering ist“.[31]

Der Zusammenhang zwischen dem Fahrermodell basierend auf der sequentiellen Folge aus Perzeption, Kognition und Handlung und den Assistenzsystemen ist entsprechend den Ausführungen in Abbildung 2-3 dargestellt.

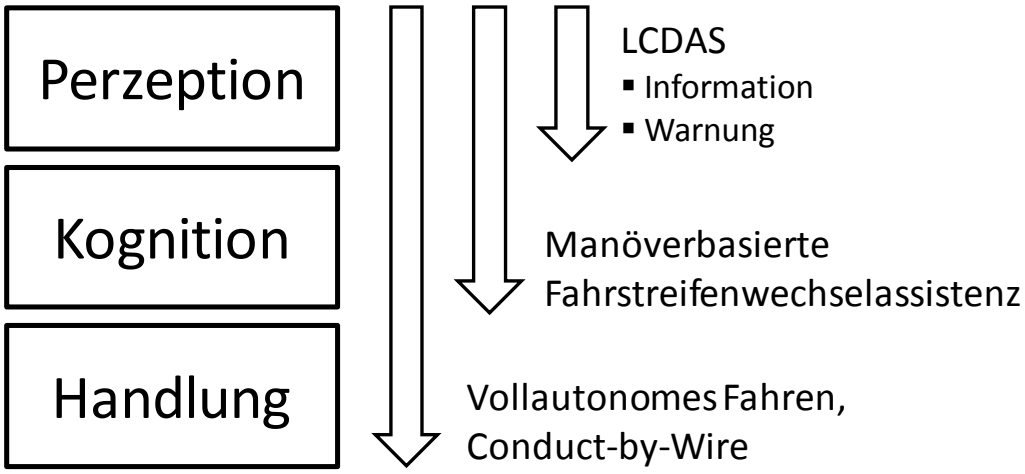


Abbildung 2-3: Menschliche Informationsverarbeitung und entsprechende Assistenzsysteme

Entsprechend der Abbildung und den Ausführungen werden alle drei Ebenen von vollautonomen Systemen übernommen, während teilautomatisierte Systeme wie CbW den Fahrer auf alle Ebenen unterstützen. LCDAS unterstützen den Fahrer auf der Perzeptionsebene mittels Informationen und Warnungen und der manöverbasierte Fahrstreifenwechselassistent unterstützt bei der Perzeption und der Kognition. In Kapitel 3 Stand

[30] Hakuli et al.: Functions for CbW, 2010

[31] Abendroth et al.: Die Leistungsfähigkeit des Menschen, 2009, S. 8

der Forschung und Technik werden die LCDAS und die automatisierten Fahrzeugführungssysteme wie CbW detailliert analysiert.

2.3 Einordnung der manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenz

Das manöverbasierte Fahrstreifenwechselassistenzsystem unterstützt den Fahrer bei seinen Fahrstreifenwechselaufgaben. Somit stellt es eine Einzelhandlungen verknüpfende Manöverunterstützung des Fahrers von der Intentionsbildung bis zur Wechseldurchführung bereit, ohne die Wechseldurchführung zu automatisieren. Dazu wird der Fahrer, wie erläutert, bei der Perzeption und der Kognition unterstützt. Dafür verwendet das System, wie in Abbildung 2-4 dargestellt, Informationen aus dem Umfeld und fahrzeugeigene Größen. Die Fahrer-Fahrzeug-Kommunikation erfolgt auf Bahnführungsebene durch eine Manöverempfehlung. Diese langfristige Empfehlung enthält Informationen zur Fahrweise vor und während dem Fahrstreifenwechsel und ist das wesentliche Unterscheidungsmerkmal zu anderen Assistenzsystemen, die ebenfalls auf Bahnführungsebene angesiedelt sind, wie das LDW-System. Die Ausführung des Manövers auf der Stabilisierungsebene mittels der Elemente des HMIs, Pedale und Lenkrad, erfolgt weiterhin durch den Fahrer. Damit ist der Fahrer weiterhin im Regelkreis. Während die Wahrnehmung und Bewertung der Geschwindigkeiten und Abstände der Fahrzeuge auf dem Zielfahrstreifen und die Bewegungsprädiktion entfällt, bleibt die Wahrnehmung der Manöverempfehlung erhalten. Die anspruchsvollen Kognitionsaufgaben der Prüfung der Durchführbarkeit eines Fahrstreifenwechsels, die Auswahl einer Lücke basierend auf einer Situationsprädiktion sowie die Berücksichtigung weiterer Einflussfaktoren wie der Beschleunigungsfähigkeit, der Nutzenbewertung, etc. entfällt ebenfalls. Je nach Gestaltung der Manöverempfehlung und der individuellen Lernfähigkeit ist es weiterhin möglich, dass die Aufgabe des Fahrstreifenwechsels mit dem manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenten nicht auf der regelbasierten Ebene verbleibt[32], sondern tendenziell in den Bereich des fertigkeitsbasierten Wissens wechselt.

[32] Schneider: Modellierung und Erkennung von Fahrsituationen und Fahrmanövern, 2009, S. 19

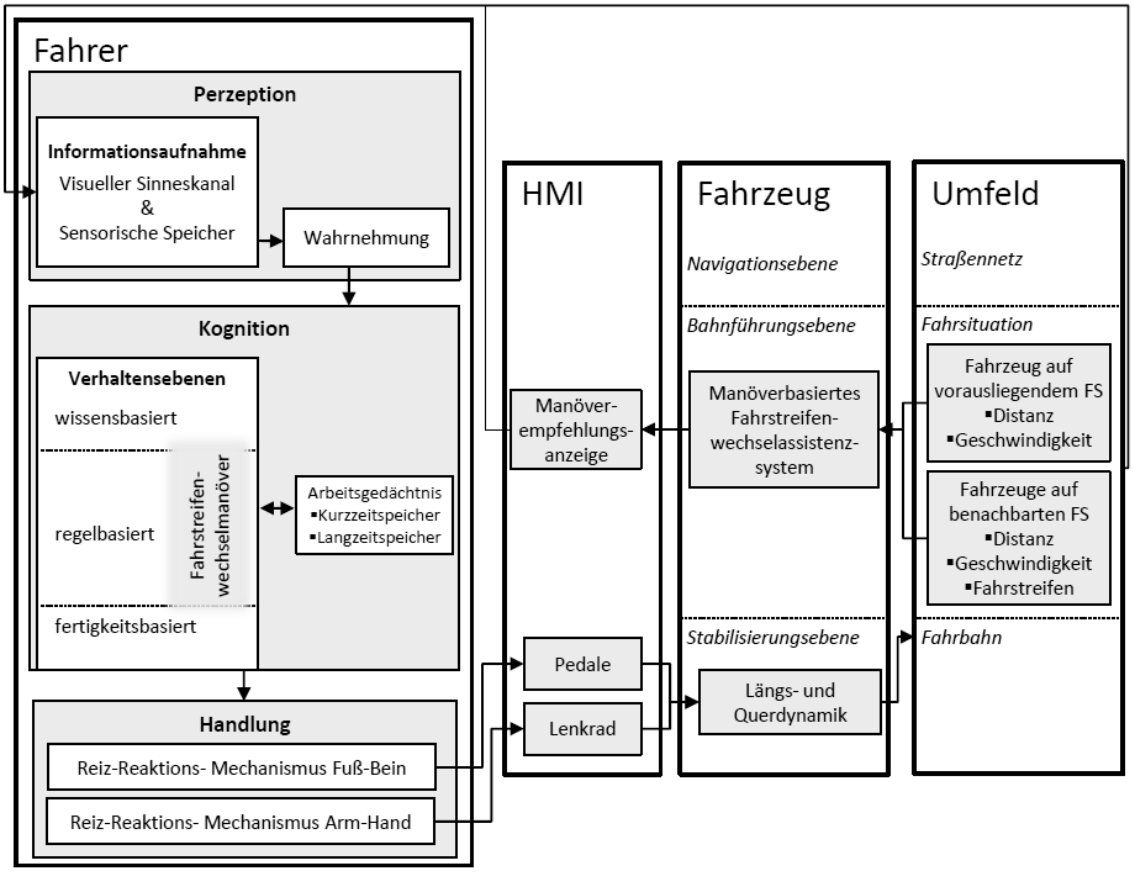


Abbildung 2-4: Modell der manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenz basierend auf Donges[33], Rasmussen[34] und Abendroth[35]

Somit ist die manöverbasierte Fahrstreifenwechselassistenz als eine Einzelhandlungen verknüpfende Assistenz, die den Fahrer auf Kognitionsebene mittels einer Manöver-empfehlung unterstützt, definiert.

[33] Donges: Führung von Personenkraftwagen, 1982

[34] Rasmussen: Skills, Rules, and Knowledge, 1983

[35] Abendroth et al.: Leistungsfähigkeit des Menschen, 2009

3 Stand der Forschung und Technik

LCDAS unterstützen den Fahrer bei der Basisentscheidung über die Wechseldurchführbarkeit. Daneben existieren Systeme, die Wechsel empfehlen und einzelne Funktionen kombinieren, um den Fahrer beim Fahrstreifenwechsel zu entlasten. Die Manöverassistenzsysteme unterstützen den Fahrer auf der Bahnführungsebene, geben eine Empfehlung und sind meist hochautomatisiert.

3.1 Lane Change Decision Aid Systems

Systeme, die den Fahrer über Fahrzeuge auf dem benachbarten Fahrstreifen informieren und ggf. warnen werden nach ISO 17387[36] als Lane Change Decision Aid Systems bezeichnet und spezifiziert. Abbildung 3-1 zeigt ein vereinfachtes Systemzustandsdiagramm nach ISO 17387, das die Funktionsweise bei aktiviertem System darstellt.

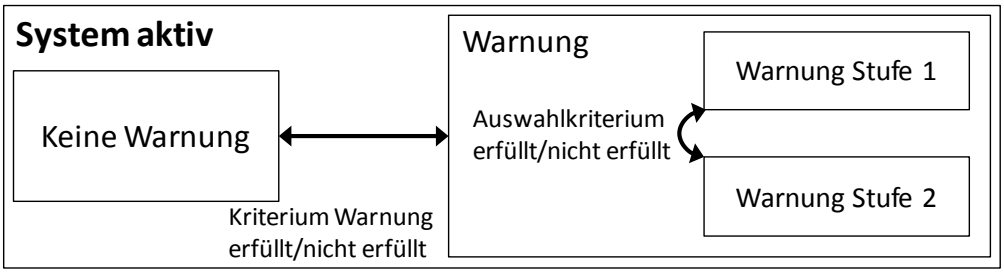


Abbildung 3-1: Systemzustandsdiagramm für LCDAS nach ISO 17387[36]

Aktiviert wird das System beispielsweise durch eine Fahrereingabe oder durch Überschreiten einer Aktivierungsgeschwindigkeit. Die Voraussetzungen für eine Warnung sind zeitliche und räumliche Bedingungen der umgebenden Objekte. Das Auswahlkriterium beeinflusst die Warnstufe und ist von der Dringlichkeit der Warnung abhängig. Meist ist die Bedingung für die Warnstufe an die Betätigung des Fahrtrichtungsanzeigers gebunden. Nachfolgend werden wesentliche Spezifikationen der Systeme erläutert.

Die meisten Hersteller verwenden 24 GHz-Radarsensoren, die sich im Heckstoßfänger des Fahrzeugs befinden und von außen nicht sichtbar sind. Volvo dagegen verwendet eine Kamera, die jeweils unter dem linken und rechten Außenspiegel angebracht ist.[37] Citroen setzt Ultraschallsensoren zur Überwachung der benachbarten Fahrstreifen in

[36] International Organization for Standardization: ISO 17387: LCDAS, 2008

[37] Bartels et al.: FAS-Handbuch: Fahrstreifenwechselassistenz, 2009, S. 566

unmittelbarer Fahrzeugnähe ein.[38] In Abhängigkeit des gewählten Sensors und des herstellerspezifischen Auslegungskonzepts variieren die Aktivierungsgeschwindigkeit, die Reichweite entlang des Fahrbahnverlaufs, innerhalb derer eine Warnung erfolgt, und die maximal unterstützte Geschwindigkeit. Des Weiteren wird zwischen reinem Totwinkelassistenten und Assistenten, die auch von hinten schnell herannahende Fahrzeuge erkennen, differenziert. Während Citroen[38] und Volvo mit ihrer Sensorik nur einen kleinen Bereich von circa 3 x 3 m bzw. 3 x 9,5 m abdecken können, legt Mercedes-Benz trotz größerer Sensorreichweite den Warnbereich ähnlich groß aus und realisiert damit einen Totwinkelassistenten.[39] Die Aktivierungsgeschwindigkeit liegt zwischen 10 km/h (Volvo)[40] und 60 km/h (Mazda)[41]. Alle Hersteller verwenden ein optisches Element in der A-Säule oder am Spiegel zur Fahrerwarnung. Das optische Warnelement eines Audi S5 im Spiegelgehäuse ist in Abbildung 3-2 dargestellt.

Abbildung 3-2: Außenspiegel eines Audi S5 mit optischem Warnelement des Side Assist

Zusätzlich zur optischen Warnung setzt GM in den USA eine Sitzvibration ein und BMW verwendet eine Lenkradvibration[42,43]. Einige Hersteller warnen den Fahrer zusätzlich mit einem Warnton. Abgesehen von Volvo[44] verwenden alle Hersteller eine zweistufige Warnstrategie wie in der Norm beschrieben. Als Auswahlkriterium wird der Fahrtrichtungsanzeiger verwendet.

---

[38] Robert Bosch AG: Ultraschallsensoren für Citroen Side View Assist, 2010, S. 1

[39] Bartels et al.: FAS-Handbuch: Fahrstreifenwechselassistenz, 2009, S. 566

[40] Bartels et al.: FAS-Handbuch: Fahrstreifenwechselassistenz, 2009, S. 566

[41] Internetquelle: http://www.mazda.com/csr/safety/special_features/2008_01_01.html, Abruf am 10.10.2011

[42] Hella: Spurwechselwarnung von Hella für BMW 7er, 2008

[43] BMW Group München: Aktive und passive Sicherheit bei BMW, 2008

[44] Bartels et al.: FAS-Handbuch: Fahrstreifenwechselassistenz, 2009, S. 566

3.2 Kombinierte Assistenzsysteme

Zu der Gruppe der kombinierten Assistenzsysteme zählen alle Methoden, die bereits bekannte Fahrerassistenzsysteme, z.B. Adaptive Cruise Control (ACC), LDW und LKAS, erweitern oder miteinander kombinieren, ohne das bestehende Fahrzeugführungskonzept zu ändern oder die Manöverausführung zu automatisieren. Die detaillierten Ergebnisse der einzelnen Studien sind den nachfolgend genannten Veröffentlichungen zu entnehmen, da diese nur im Kontext mit der Systemspezifikation und dem Versuchsdesign Gültigkeit besitzen und eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse der präsentierten Studien nicht gewährleistet ist.

Eine Kombination der konventionellen Fahrerassistenzsysteme LDW, LKAS, und LCDAS wird von Mann[45] beschrieben. Er bewertet den *Querführungsassistenten* mit Probandenversuchen sowohl im Simulator als auch in einem Prototypfahrzeug und leitet Gestaltungsempfehlungen für die Systemfunktionalität, die Sensorik und das HMI ab.

Die Kombination von Systemen zur Vermeidung gefährlicher Fahrstreifenwechsel und Systemen zur Beeinflussung der Längsdynamik, z.B. ACC und Collision Mitigation Brake System (CMBS), wurden in zahlreichen Forschungsprojekten untersucht. So wurde als Teil des von 1986 bis 1994 durchgeführten PROMETHEUS-Projekts[46] (*Programme for European Traffic with Highest Efficiency and Unprecedented Safety*), dessen Ziel ein sicherer und effizienterer Straßenverkehr war, ein Fahrzeug entwickelt, das in der Lage ist, den Fahrstreifen, die Geschwindigkeit und den Abstand zum Vorderfahrzeug zu halten, den Fahrstreifen zu wechseln, zu überholen und Kollisionen im Längs- und Querbereich zu verhindern.

Innerhalb der Forschungsinitiative *Intelligenter Verkehr und nutzergerechte Technik* (INVENT) arbeiteten bis 2005 23 Automobilhersteller, -zulieferer und Forschungsinstitute u.a. in den Projekten *Stauassistenz*[47] und *Vorausschauende Aktive Sicherheit*[48] an Funktionen zur Querführungsassistenz. Dies waren LDW, LKAS, LCDAS, die automatisierte Kompensation von Störgrößen und eine Ausweichassistenz. Im Rahmen des Projekts wurden auch innovative Systeme in einem Lkw integriert, dazu zählte eine Fahrstreifenwechselempfehlung bei langsam, vorausfahrenden Fahrzeugen.

2005 startete das *Integrated Vehicle-Based Safety System Programme*, in dem die Universität von Michigan[49] mit der National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) kooperierte. Ziel des vierjährigen Programms war die Entwicklung und die

[45] Mann: Entwicklung eines Querführungsassistenten, 2008

[46] Ulmer: Active Collision Avoidance, 1994

[47] BMBF, Invent: Stauassistent, 2005

[48] BMBF, Invent: Vorausschauende Aktive Sicherheit, 2005

[49] Green: IVBSS, 2008

Integration eines Antikollisionssystems mit sowohl längs- als auch quervermeidender Wirkung in einem Prototyp. Dazu wurden die Funktionen Auffahrwarnung, LDW, LCDAS und Kurvengeschwindigkeitswarnung implementiert und in Fahrversuchen mit Probanden bewertet. Zusätzlich wurden die Systeme Auffahrwarnung, LDW und LCDAS in 18 Zugmaschinen mit einem zulässigen Gesamtgewicht von mindestens 15 t integriert und über eine Periode von zehn Monaten getestet.[50]

Im Rahmen des europäischen Forschungs- und Entwicklungsprogramm PReVENT[51] wurde bis 2008 unter anderem die kombinierte Funktion von LCDAS und ACC realisiert. Beteiligt an der Entwicklung des Fahrstreifenwechselassistenten waren die Automobilhersteller Volvo, Daimler-Chrysler und Fiat sowie Universitäten und Automobilzulieferer. In einem Lkw von Volvo wurde ein System integriert, das den vorderen, seitlichen und hinteren Bereich überwacht. Vor gefährlichen Fahrstreifenwechseln warnt das System durch eine haptische Rückmeldung am Lenkrad in Form eines aufgeprägten Gegenmoments. In einem Versuchsfahrzeug von Fiat wurde ebenfalls ein System zur Rundumüberwachung eingebaut.

Zahn von der BMW AG stellte ein Konzept für ein Assistenzsystem vor, das den Fahrer bei Fahrstreifenwechselvorgängen sowohl bei der Verkehrsraumüberwachung als auch bei der Fahrzeuglängs- und querführung[52,53,54] in integrierter Form unterstützt. Dabei wurden ACC, LKAS und LCDAS miteinander kombiniert.

Lange[55] führt in seiner Dissertation mit dem Thema Wirkung von Fahrerassistenzsystemen auf der Führungsebene eine Untersuchung zur Bedienfreundlichkeit von HMIs durch. Er beschreibt einen Überholassistenten, der ein „Grünes Licht“ aufleuchten lässt, wenn das Überholen möglich ist und warnt, wenn Überholen nicht möglich ist. Dieses Konzept wurde jedoch nicht weiter detailliert und nicht realisiert.

Als Partner der Forschungsinitiative *Adaptive und Kooperative Technologien für Intelligenten Verkehr* (AKTIV) entwickelte der Zulieferer Continental ein elektronisches Baustellenassistenzsystem[56]. Es unterstützt den Fahrer in Baustellen in der Querführung durch die Funktionen Virtual Wall, Heading Control und Lane Centering, die mittels Lenkradmomenten dem Fahrer beim Spurhalten assistieren. Zusätzlich wurde zur Unterstützung der Längsführung eine Aktive Gefahrenbremsung (AGB) mit Multiobjektfähigkeit realisiert. Der Eingriffszeitpunkt ist von der Durchführbarkeit eines Aus-

[50] Sayer et al.: IVBSS Final Report, 2011

[51] Schulze et al.: PReVENT 2008 Final Report, 2008

[52] Kölbl et al.: Quer- und Längsregler zur Fahrzeugführung, 2006

[53] Zahn et al.: Integrierte Längs- und Querführung, 2003

[54] Ehmanns et al.: Integrierter Querführungsassistenz, 2002

[55] Lange, Christian: Wirkung von Fahrerassistenz auf der Führungsebene, 2008, S. 96 ff.

[56] Lüke et al.: Fahrerunterstützung in Baustellen, 2010, S. 212

weichmanövers abhängig. Das Lateral Collision Avoidance System (LCA) von BMW ergänzt das LCDAS um eine Seitenüberwachung. Der Fahrer wird im Head-Up-Display über den seitlichen Abstand informiert und bei drohender Kollision mittels Lenkradmoment gewarnt.[57]

Ein Überholassistenzsystem wurde im zweiten PRORETA-Projekt von der Technischen Universität Darmstadt und Continental entwickelt.[58] Gefährliche Überholmanöver werden detektiert und der Fahrer wird gewarnt oder eine Bremsung wird eingeleitet. Die Querführung bleibt dem Fahrer überlassen.

Diese Funktionen der Ausweich-, Überhol- und Fahrstreifenwechselempfehlung bilden den Übergang zu den manöverbasierten Assistenzsystemen, die im nachfolgenden Kapitel beschrieben sind.

3.3 Manöverbasierte Fahrzeugführung und Assistenz

Nachfolgend sind Systeme mit Handlungsempfehlung oder automatisierter Manöverausführung zusammengefasst. Dabei ist zwischen den manöverbasierten Assistenzsystemen, zu den der im Rahmen der vorliegenden Dissertation entwickelte manöverbasierte Fahrstreifenwechselassistent zählt, und den manöverbasierten Fahrzeugführungskonzepten zu unterscheiden. Beide Systeme unterstützen den Fahrer auf der Bahnführungsebene des 3-Ebenen Modells nach Donges[59]. Manöverbasierte Assistenzsysteme unterstützen den Fahrer durch die Ausgabe von Handlungsempfehlungen über die Gesamtdauer des Fahrmanövers, während die manöverbasierten Fahrzeugführungssysteme, z.B. Conduct-by-Wire und H-Mode, den Fahrer auch auf der Ausführungsebene[60] unterstützen und partiell automatisierte Systeme sind.

Winner beschreibt 2006 ein innovatives Konzept zur Fahrzeugführung mittels Manöverschnittstelle namens Conduct-by-Wire (CbW). [61] Dies ist ein seriell-sequentielles System, das dem Fahrer ermöglicht, auf Bahnführungsebene Manöver zu beauftragen, die automatisiert vom Fahrzeug durchgeführt werden. Das Unterstützungsniveau und damit verknüpft die Verfügbarkeit der Manöver ist maßgeblich von der Umgebung und den technischen Grenzen der Umgebungswahrnehmung abhängig.[62] Ein mögliches HMI des

[57] BMW Group München: Lateral Collision Avoidance, 2010, S. 60 ff.

[58] Mannale et al.: Fahrerassistenz in Überholsituationen, 2008

[59] Donges: Aspekte der aktiven Sicherheit, 1982

[60] nach Abbildung 2-3

[61] Winner et al.: Conduct-by-Wire, 2006

[62] Kauer et al.: How to conduct a car?, 2010

Systems wurde von Kauer[63] dargestellt. Die Manöverschnittstelle basiert auf einem Touchscreen und einem Head-Up-Display. Stabilisierungseingaben sind weiterhin über Pedale und Lenkrad möglich.

H-Mode[64,65] verwendet die Metapher eines Pferdes (H als Abkürzung für das engl. Wort Horse), um die Kooperation zwischen dem Fahrer und der Automation zu beschreiben. So wird in Abhängigkeit des Assistenzlevels zwischen „loose rein“ (dt. lockere Zügel) und „tight rein“ (dt. straffe Zügel) differenziert. Fahrer und Automation interagieren auf allen drei Ebenen nach Donges. Ihre Stellwünsche werden überlagert und in Abhängigkeit des Assistenzlevels gewichtet. Das HMI-Konzept wurde in Prototypen realisiert und in Simulatorversuchen mit Probanden bewertet.[66]

Die Parkführung[67] von Mercedes-Benz prüft die Größe von Lücken, um ihre Eignung zu beurteilen und stellt dem Fahrer in einer Vogelperspektive das eigene Fahrzeug sowie die relevante Lücke dar. Eine rote Fahrspur zeigt die Trajektorie bei momentanem Lenkradeinschlag; eine gelbe Fahrspur zeigt die empfohlene Trajektorie. Bringt der Fahrer beide Fahrspuren zur Überdeckung, färbt sich die Fahrspur grün. Auf diese Weise wird der Fahrer in mehreren Schritten in die Parklücke geführt.

Im Rahmen des europäischen Forschungsprojekts *Highly Automated Vehicles for Intelligent Transport* (HAVEit) entwickelten 17 Partner mehrere Prototypen, die den Fahrer mit drei Automatisierungsmodi entlasten.[68] Im assistierten Modus wird der Fahrer beispielsweise beim Bremsen und Spurhalten unterstützt. Im semiautomatisierten Modus kann der Fahrer die Längsführung an das System übertragen und im hochautomatisierten Modus übernimmt das System auch die Querführung. Der Fahrstreifenwechselassistent im FasCar II des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt empfiehlt Fahrstreifenwechsel und, nach dem Setzen des Fahrtrichtungsanzeigers und Anreißen des Lenkrads, wird das Manöver automatisiert ausgeführt.[69]

Das auf Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation basierende „Ampelassistenzsystem“ von BMW empfiehlt vor Lichtsignalen einen Geschwindigkeitsbereich durch farbliches Hervorheben auf dem Tachometer, um noch bei Grün die Kreuzung zu passieren bzw.

---

[63] Hakuli et al.: Handbuch FAS: Kooperative Automation, 2009, S. 652

[64] Heesen et al.: Haptisch-multimodale Interaktion für kooperative Fahrzeugführung, 2010

[65] Hakuli et al.: Handbuch FAS: Kooperative Automation, 2009, S. 653 ff.

[66] Kelsch et al.: H-Mode beim Annähern, Notbremsen, Ausweichen, 2009

[67] Knothe et al.: Die neue CL-Klasse von Mercedes-Benz, 2008, S. 10 ff.

[68] HAVEit: Pressemitteilung: Fahren per Knopfdruck, 2011

[69] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt: Pressemitteilung: Assistenz- und Automationsstufen, 2011

warnt bei drohender Rotlichtmissachtung durch eine visuelle Warnung im Head-Up-Display.[70, 71]

Volkswagen entwickelte im Rahmen von AKTIV einen Assistenten zur Steigerung der Sicherheit von Radfahrern und Fußgängern.[72] Das System bewertet die Kritikalität der Situation und leitet eine automatische Bremsung ein, um eine Kollision zu vermeiden. Ist ein Ausweichen möglich, erhält der Fahrer durch ein Lenkmoment eine Ausweichempfehlung.

Kirchner beschreibt in seiner Offenlegungsschrift[73] von 2005 einen Autobahnassistenten, der bei der Detektion eines langsameren vorausfahrenden Fahrzeugs das vom LKAS induzierte Lenkradmoment reduziert und bei weiterer Annäherung ein Moment in Richtung Zielfahrstreifen aufbaut, wenn ein sicherer Fahrstreifenwechsel möglich ist, um diesen Wechsel zu empfehlen.

3.4 Human Machine Interface

Nachfolgend sind als Ergänzung zu den im vorhergehenden Kapitel beschriebenen menschlichen Verhaltensmodellen und zu den Gestaltungsrichtlinien von Human Machine Interfaces, die umfassend in 74 beschrieben sind, Forschungen und Entwicklungen von HMIs zu Fahrerassistenzsystemen zusammengefasst, soweit sie noch nicht beschrieben wurden. Grundlagen zu Bedienelementen[75], Anzeigen[76] und Fahrerwarnungen[77] finden sich darüber hinaus im Handbuch Fahrerassistenzsysteme.

Beim CbW-Konzept beauftragt der Fahrer die Fahrmanöver mittels eines Touchscreens, der mittig auf dem Lenkrad angebracht ist und die verfügbaren Manöver als Piktogramme darstellt. Die Bestätigung des Manöverauftrags sowie die Übermittlung weiterer Informationen kann mittels Displayvibration erfolgen. Die Stabilisierung erfolgt mittels Lenkrad und Pedalerie.[78]

---

[70] Thoma et al.: Geschwindigkeitsempfehlungen während der Annäherung an eine Ampel, 2008

[71] BMW Group München: Pressemappe: Fahrerassistenzsysteme, 2008

[72] Volkswagen: Pressemitteilung: Forschungsprojekt AKTIV, 2010

[73] Kirchner: Offenlegungsschrift DE102005050662A1, 2005

[74] Bruder et. al.: Gestaltung von Mensch-Maschine-Schnittstellen, 2009, S.314 ff.

[75] Bruder et al.: Bedienelemente, 2009, S.325 ff.

[76] Knoll: Anzeigen für Fahrerassistenzsysteme, 2009, S.330 ff.

[77] Hoffmann et al.: Fahrerwarnelemente, 2009, S. 343 ff.

[78] Kauer et. al.: How to conduct a car?, 2010, S.1214 ff.

Um die Interaktion von Fahrer und Automation auf den verschiedenen Ebene der Automatisierung zu realisieren, verwendet das H-Mode Konzept für das HMI einen "haptisch-multimodalen" Ansatz basierend auf aktiven Pedalen und einem Lenkrad mit Stellmotor. Diese HMI-Elemente ermöglichen einen Informationsaustausch durch Kraft und Position und weitere haptische Signale. Das HMI basiert weiterhin auf den Elementen Pedal und Lenkrad.[79]

Eine multifunktionales HMI basiert auf einer LED-Matrix unterhalb der Frontscheibe und soll die Vorteile von Head-Up-Displays und Head-Down-Displays vereinen. Positive Ergebnisse lieferte der Vergleich eines Nightvision Systems basierend auf einem Head-Up-Displays und dem multifunktionalem HMI.[80]

In einer Simulatorstudie wurden Head-Up-Display Varianten untersucht. 2D Warnsymbole wurden mit kontaktanalogen 3D Warnsymbolen verglichen. Am besten schnitten Symbole ab, die das Fahrzeugumfeld abbilden.[81]

3.5 Fazit des Stands der Forschung und Technik

Obwohl die genannten Systeme teilweise mehr als nur die Basisentscheidung *wechseln* oder *nicht wechseln* adressieren, unterstützen die Systeme den Fahrer nicht während des kompletten Fahrstreifenwechsels von der Wechselabsichtsbildung bis zur Wechseldurchführung auf Perzeptions- und Kognitionsebene. Die hier genannten Systeme liefern dem Fahrer lediglich zusätzliche Informationen und keine Fahrstreifenwechselempfehlung, die ihm eine konkrete Verhaltensweise darstellt. Ein im Prototyp realisiertes System, das den Fahrer auffordert, einen Wechsel in eine, aus mehreren Alternativen ausgewählte Lücke durchzuführen, ist nicht bekannt. Wie im nachfolgenden Kapitel aufgezeigt wird, ist die Manöverempfehlung das zentrale Konzept des fahrerfokussierten Assistenzsystems. Darüber hinaus ist der manöverbasierte Fahrstreifenwechselassistent ein proaktives Fahrerassistenzsystem. Es ist kein weiteres System (abgesehen von Navigationssystemen) bekannt, das ähnlich vorausschauend agiert. Der Nutzen der manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenz ist bislang nicht nachgewiesen.

---

[79] Flemisch et al.: Haptisch-multimodale Interaktion für kooperative Fahrzeugführung, 2010

[80] Spanner-Ulmer et al.: Aufmerksamkeitssteuerung durch Anzeigen,

[81] Bubb et al.: Ergonomic Desing an Evaluation of Augmented Reality, 2009

4 Konzeption des manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenzsystems

Das Konzept des manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenzsystems beruht auf der Analyse des Fahrstreifenwechselvorgangs und der Ableitung von Anforderungen. Verschiedene Lösungsansätze zur Erfüllung der Anforderungen werden entwickelt. Die finale Lösung ist die Manöverempfehlung und die Situationsbeschreibung mittels Vorsteuerprogrammen, die der Fahrer umsetzt.

4.1 Fahrstreifenwechselanalyse und Anforderungsdefinition

Nachfolgend wird der Fahrstreifenwechselvorgang analysiert und basierend auf der Analyse werden Anforderungen an das manöverbasierte Fahrstreifenwechselassistenzsystem abgeleitet.

4.1.1 Zeitlicher Ablauf des Fahrstreifenwechsels

Wird die Fahrzeugbewegung während eines Fahrstreifenwechselmanövers betrachtet, so lässt sich ein Fahrstreifenwechsel auf einen linken Fahrstreifen, auf dem schneller gefahren wird, in die Phasen Folgefahrt, Ausscheren, Vorbeifahrt und, um z.B. das Überholmanöver abzuschließen, Einscheren gliedern. Während dieser Zeit absolviert der Fahrer zwei Phasen: eine Entscheidungsphase und eine Durchführungsphase. Während der Entscheidungsphase erfolgt zunächst die Absichtsbildung, beispielweise aufgrund eines vorausfahrenden, langsamen Fahrzeugs oder aufgrund der Routenverfolgung, die einen Wechsel vom Beschleunigungsstreifen auf einen regulären Fahrstreifen vorsieht, und im Anschluss eine Situationsbewertung, ob und wann der Wechsel möglich ist und wie das Fahrverhalten anzupassen ist. Im Anschluss wird in der Durchführungsphase vom Start- auf den Zielfahrstreifen gewechselt. Der zeitliche Ablauf und der erläuterte Zusammenhang zwischen Fahreraufgabe und Fahrzeugbewegung ist in Abbildung 4-1 dargestellt.

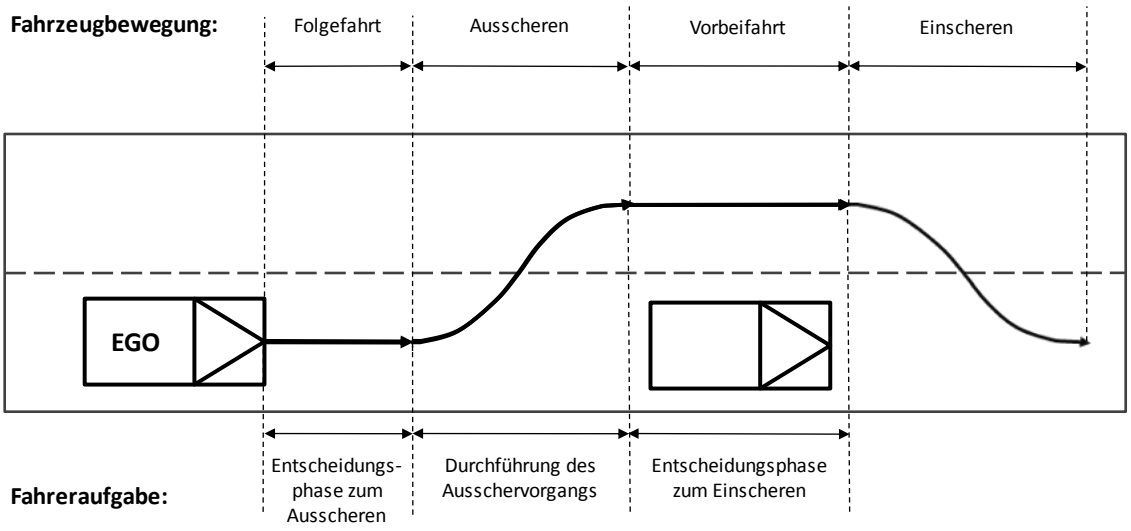


Abbildung 4-1: Fahrzeugbewegung und Fahreraufgaben bei einem Fahrstreifenwechsel nach links

Zur Realisierung einer manöverunterstützenden Assistenz ist der Fahrer über das gesamte Fahrstreifenwechselmanöver entsprechend seiner Bedürfnisse zu unterstützen. Daneben zeigt diese Betrachtung, dass der Fahrer hinsichtlich seiner Fahrzeugdynamik in x- und y-Richtung zu unterstützen ist. Um auf Änderungen der Situation durch die umgebenden Fahrzeuge, die bei unzureichender Reaktion möglicherweise gefährlich für den Fahrer sind, flexibel reagieren zu können und um unterschiedlich große Lücken auf dem Zielfahrstreifen für einen Wechsel zu nutzen, ist eine Eskalationsmöglichkeit bzgl. der Fahrzeugdynamik und der zeitlichen Information vorzusehen.

Diese generische Analyse wird nachfolgend um eine Unfallstatistikanalyse sowie eine systematische Kombination von Szenarienparametern und eine Darstellung der Fahralternativen ergänzt.

4.1.2 Fahrstreifenwechselszenarien und -alternativen

Laut einer Auswertung der GIDAS Datenbank mit Stand von 2003[82] erfolgen zwei Drittel aller Fahrstreifenwechselkollisionen bei einem Wechsel des Unfallverursachers nach links. Die meisten Fahrstreifenwechselkollisionen passieren am Tag bei trockener Straße. In diesen Punkten, genauso wie bei der Altersverteilung der Unfallverursacher, existieren kaum Unterschiede zu einem durchschnittlichen Unfallereignis. Allerdings treten 52,1 % aller Fahrstreifenwechselkollisionen außerorts und meist auf Autobahnen auf. Durchschnittlich finden nur 30,5 % aller Unfälle außerorts statt. Überdurchschnittlich oft treten Fahrstreifenwechselunfälle auf gerader Straße auf. Das Verletzungsrisiko ist gering. In Baustellen treten Fahrstreifenwechselkollisionen zweieinhalb Mal häufiger auf als auf den übrigen Strecken. Bei einem Drittel aller Fahrstreifenwechselunfälle

[82] Mann: Entwicklung eines Querführungsassistenten, 2008, S. 67 ff.

kollidiert der Unfallverursacher bei einem Fahrstreifenwechsel, den er auf Grund eines langsameren vorausfahrenden Fahrers eingeleitet hat, mit dem nachfolgenden Verkehr auf dem Zielstreifen.

Neben den Szenarien aus der Auswertung der GIDAS-Datenbank wurde ein Szenarienkatalog erstellt, um die Fahrstreifenwechsel und die Fahralternativen zu erfassen. Die Vorgehensweise basierend auf Kreativmethoden und Mitteln zur Reduktion der Variantenvielfalt folgt dem in [83] beschriebenen Vorgehen. Der Szenarienkatalog in Form eines Ordnungsschemas ist in Abbildung 8-1 im Anhang dargestellt und ausführlich erläutert. Er besteht aus den Parametern *Objekte auf den Nachbarfahrstreifen*, *Fahrstreifenwechselursache* und *Wechselrichtung*.

Zur Funktionsentwicklung sind einige Parameter des Szenarienkatalogs bedeutungslos. Somit wurde der Szenarienkatalog auf acht Elementarszenarien jeweils für Fahrstreifenwechsel nach links und nach rechts reduziert. Eines der Szenarien ist beispielhaft in Abbildung 4-2 dargestellt. Die vollständige Darstellung aller Elementarszenarien ist im Anhang in Abbildung 8-2 und Abbildung 8-3 dargestellt. Der Fahrer hat neben der Weiterfahrt auf dem Startfahrstreifen die Möglichkeit in drei verschiedene Lücken auf dem Zielfahrstreifen zu wechseln. Aus diesen soll der manöverbasierte Fahrstreifenwechselassistent anhand definierter Kriterien (siehe nachfolgendes Kapitel) die beste, verfügbare Lücke auswählen.

Abbildung 4-2: Beispielhaftes Elementarszenario mit zwei Objekten auf dem Zielfahrstreifen

4.2 Manöverempfehlung

Bei der Konzeption der manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenz wurden zwei methodische Ansätze verfolgt, die nachfolgend beschrieben sind. Ausgehend vom Stand der Technik wurden technisch innovative Funktionen zur Assistenz der Längs- und Querdynamik abgeleitet und anhand des Fahrstreifenwechselablaufs erweitert. Auf diese Weise entstand ein Zustandsdiagramm, das sowohl die Strategie als auch die

[83] Habenicht et al.: Test- und Bewertungsmethoden für Sicherheitssysteme der Bahnführungsebene, 2008, S. 592 ff.

Empfehlung beinhaltet. In Ergänzung wurde basierend auf der Fahrstreifenwechselanalyse ein fahreraufgabenorientierter Ansatz verfolgt, der zu der Spezifikation der Manöverempfehlung führte.

Stand der Technik sind LCDAS, die den Fahrer vor gefährlichen Fahrstreifenwechseln warnen. Ein explizites Auffordern zu einem empfehlenswerten Fahrstreifenwechsel, beispielsweise zum Aufrechterhalten der Wunschgeschwindigkeit, wird nicht durchgeführt. Soll diese Funktion mit einem LCDAS kombiniert werden, lässt sich die Systemfunktion in Abhängigkeit von zwei Kritikalitätsmaßen, die sich auf den Startfahrstreifen und den Zielfahrstreifen beziehen in vier Bereiche gliedern. Ist die Gefahr sowohl auf dem Zielfahrstreifen als auch auf dem Startfahrtstreifen gering, kann der Fahrer darüber informiert werden. Ist die Gefahr auf dem benachbarten Fahrstreifen, beispielsweise aufgrund eines sich von hinten nähernden Fahrzeugs, sehr groß und die Gefahr auf dem Startfahrstreifen gering, so sollte ein Wechsel vermieden werden. Ist allerdings die Gefahr auf dem benachbarten Fahrstreifen gering und die auf dem Startfahrstreifen groß, ist ein Wechsel empfehlenswert. Ist die Gefahr auf beiden Fahrstreifen sehr groß, sind die Optionen Ausweichen und Verzögern zu prüfen und eine Handlung ist einzuleiten.

Um ein solches System zu modellieren, sind Ansätze der Funktionen von ACC, CMBS und einem erweiterten LCDAS zu kombinieren. Dem Fahrer sind Empfehlungen sowohl für die Längs- als auch für Querdynamik zu vermitteln.

Die Modellierung einer solchen Empfehlung über den zeitlichen Verlauf, der in die Phasen *vor*, *während* und *nach* dem Fahrstreifenwechsel eingeteilt ist, ist als Strategie in Abbildung 4-3 dargestellt. Das Koordinatensystem zeigt die erforderliche Beschleunigung in x- und y-Richtung und stellt auf diese Weise die Empfehlung dar.

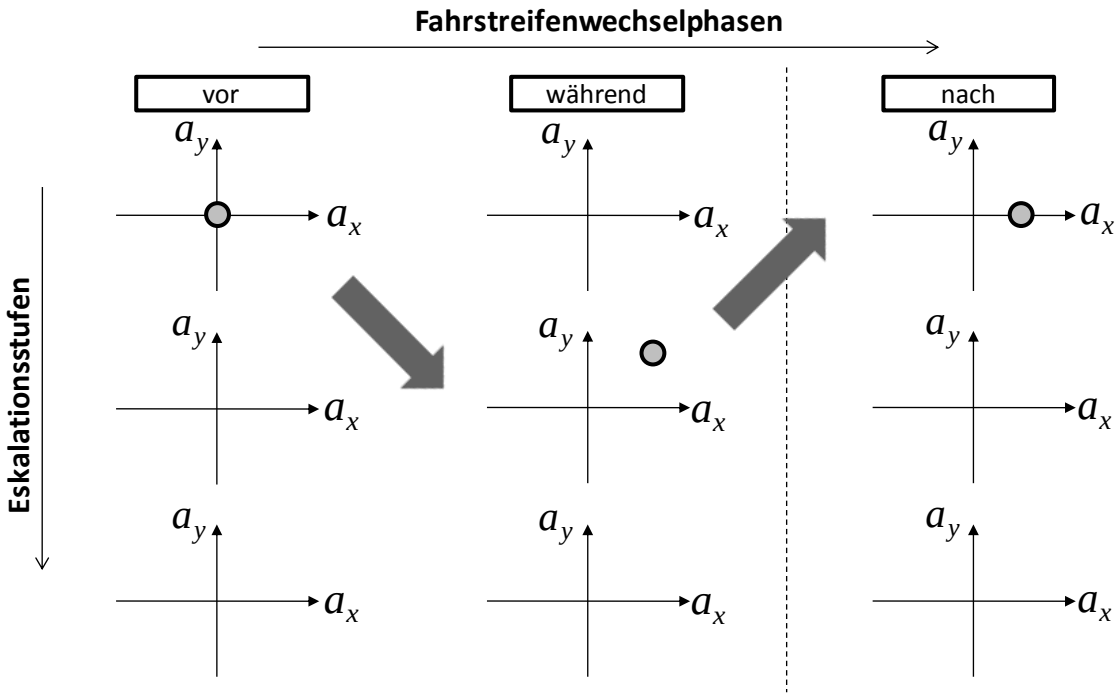


Abbildung 4-3: Modellierung der Empfehlungsstrategie

Allerdings müssen die drei Zeitphasen aus Abbildung 4-3, die auf der Fahrzeugbewegung basieren, nicht mit den Zeitpunkten der erforderlichen Dynamikänderung durch den Fahrer übereinstimmen. Darüber hinaus ist eine Darstellung der Zeit, beispielsweise der Beginn der Fahrzeuglateralbewegung, nicht abgebildet und die Darstellung ist somit nicht geeignet.

Um den zeitlichen Aspekt zu berücksichtigen, ist die Modellierung der Empfehlungsstrategie in einem Zustandsdiagramm in Abbildung 4-4 dargestellt. Die Strategie basiert auf 8 Zuständen, in denen die Quer- und die Längsdynamik eskaliert werden kann (Q1→Q2). Das CMBS überwacht permanent die Situation und greift ein, wenn dies erforderlich ist.

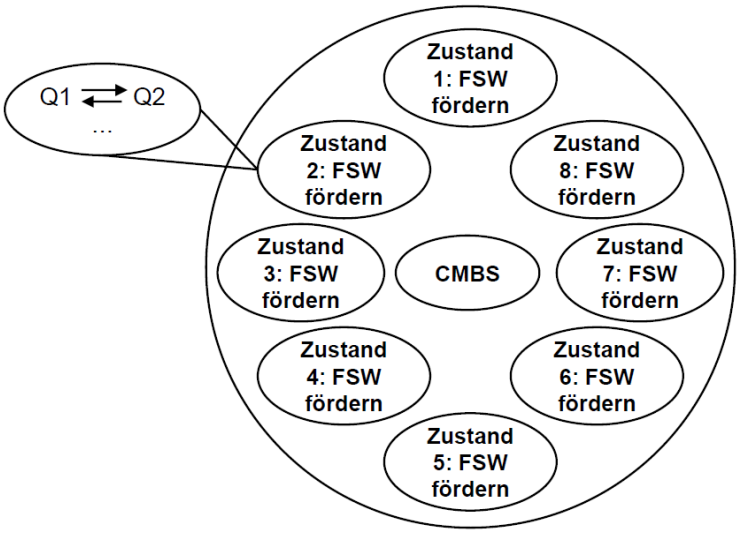


Abbildung 4-4: Zustandsdiagramm der Empfehlungsstrategie

Obwohl eine Modellierung der zeitlichen Systemzustände unabhängig von der Fahrzeugposition auf diese Weise möglich ist, beinhaltet die Grafik nicht die zeitlichen Informationen, z.B. Fahrstreifenwechselbeginn, die der Fahrer zum Wechsel benötigt.

Da die bislang dargestellten Konzepte zur manöverbasierten Fahrzeugführung nicht die Anforderungen erfüllen, wurde ein fahrerfokusierter Ansatz verfolgt, der, wie bereits in Kapitel 1.3 Methodik und Aufbau der Arbeit beschrieben, auf der Frage basiert: „Welche Informationen bzw. Empfehlungen benötigt der Fahrer, um den Fahrstreifen zu wechseln?“.

Diese sogenannte Manöverempfehlung ist die Schnittstelle zwischen Fahrer und Fahrzeug und gibt dem Fahrer Empfehlungen zu seiner Verhaltensweise, um seinen Wunsch nach der Durchführung eines Fahrstreifenwechsels zu erfüllen.

Um die Manöverempfehlungen zu definieren, sind mögliche Informationen und Empfehlungen zu sammeln und im zweiten Schritt zu bewerten, auszuwählen und ggf. zu aggregieren. Zur Identifikation möglicher Inhalte wurde der Fahrstreifenwechselvorgang analysiert. Als Teilergebnisse liegen der Szenarienkatalog im Anhang in Abbildung 8-1 und die Fahralternativen, die im Kapitel 5.3.1 Fahrstreifenwechselszenarien beschrieben sind, vor. Als Resultat der Analyse und der Verwendung von Kreativmethoden und Fahrerbefragungen liegt eine umfassende Informationssammlung der Manöverempfehlung vor. Diese ist in Abbildung 4-5 dargestellt.

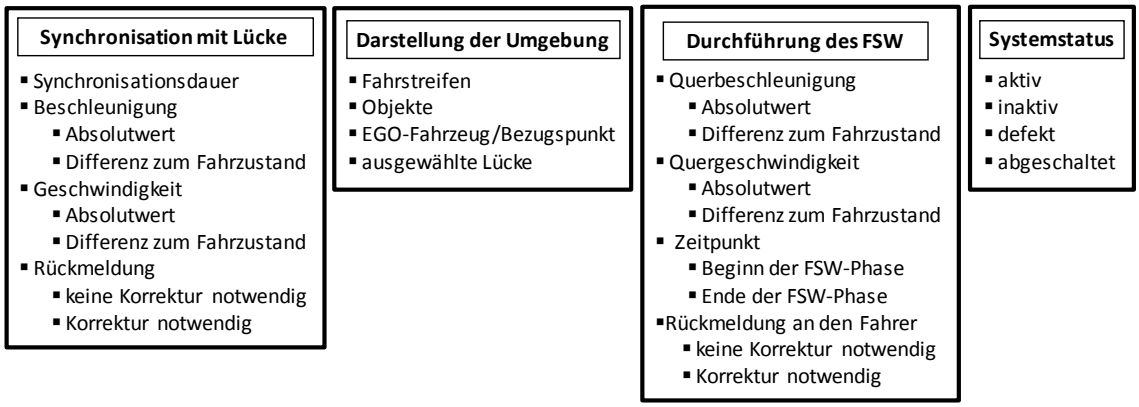


Abbildung 4-5: Inhalte der Manöverempfehlung

Die *Synchronisation mit der Lücke* beschreibt die Annäherung der Geschwindigkeit des EGO-Fahrzeugs an die Geschwindigkeit der Lücke bzw. der Fahrzeuge auf dem Zielfahrstreifen. Dazu wird für die Darstellung mittels HMI die Differenz zwischen minimaler erforderlicher Beschleunigung und vorliegender Beschleunigung ausgewählt. Die Schätzung der vorliegenden Beschleunigung durch den Fahrer ist somit nicht notwendig. Die alternative, längsdynamische Darstellung der Zielgeschwindigkeit oder der Differenz zwischen vorliegender Geschwindigkeit und Wechselgeschwindigkeit zeigt nicht den zur Geschwindigkeitsanpassung zur Verfügung stehenden Zeitraum und liefert somit nicht den erforderlichen Informationsgehalt. Aus Gründen des Komforts,

der Nachvollziehbarkeit, der Ökologie, der Wirtschaftlichkeit und der einfachen Reaktion wird dem Fahrer der minimale Betrag der erforderlichen Beschleunigung dargestellt.

Auf die *Darstellung der Umgebung* bzw. der Lückenposition wird verzichtet, um die Wahrnehmungszeit des Fahrers zu verkürzen. Eine Zentralperspektive liefert zusätzliche Informationen, aber die Interpretation der Darstellung durch den Fahrer ist anspruchsvoll[84], da seine Perspektive von der dargestellten Perspektive abweicht und somit auch diese Darstellung die Wahrnehmungszeit erhöht. Zusätzlich sind sowohl die Lückendarstellung als auch eine Vogelperspektive der Verkehrssituation zur Wechseldurchführung nicht erforderlich. Sie erleichtern dem Fahrer lediglich die Überwachung des Systems. Ausschließlich die Richtung der Lücke (links/rechts) ist dem Fahrer mitzuteilen.

Die eigenständige *Durchführung* der Lateralbewegung wird dem Fahrer überlassen, da dies nach Expertenmeinung keine schwierige Aufgabe ist und die Fahrzeugführung beim Fahrer verbleiben soll. Durch die Darstellung des ersten und des letzten Wechselzeitpunktes, unter Berücksichtigung der vorliegenden Relativgeschwindigkeiten und der longitudinalen Distanz zur Lücke, erhält der Fahrer die erforderlichen Informationen über den Wechselzeitraum und er bekommt eine Rückmeldung über sein Verhalten, da er den Wechselzeitraum durch sein längsdynamisches Verhalten dynamisch beeinflussen kann.

Der *Systemstatus* ist ein wesentlicher Bestandteil jedes Fahrerassistenzsystems. Allerdings sind diese Informationen nicht gestaltgebend und werden bei der sich anschließenden HMI-Entwicklung zunächst zurückgestellt.

Aus diesen Gründen besteht die Manöverempfehlung aus einer **räumlichen**, **zeitlichen** und **kinematischen** Information. So wird die **Wechselrichtung**, die **Zeit bis zum Beginn und zum Ende der Wechselphase** mit Berücksichtigung der vorliegenden Relativgeschwindigkeiten zwischen dem EGO-Fahrzeug und den lückenbegrenzenden Fahrzeugen und der Betrag der erforderlichen **minimalen Beschleunigungsänderung** abgebildet.

4.3 Fahrstreifenwechsel-Vorsteuerprogramme

Zur Bestimmung der Manöverempfehlung sind Fahrstreifenwechsel zu prädizieren und ihre Durchführbarkeit ist anhand der gegebenen Situation zu bewerten. Als Ergebnis der Analyse liegen Fahrstreifenwechsel-Vorsteuerprogramme vor, die den Fahrstreifenwechsel aus Fahrersicht in vier Kategorien klassifizieren, leicht verständlich und nachvollziehbar sind. Damit erfüllen sie wesentliche Anforderungen des RESPONSE Code

[84] Wickens et al.: Visual Spatial Thinking, 2005

of Practice[85] und ermöglichen darüber hinaus, wie gefordert, eine Situationsprädiktion und Durchführbarkeitsprüfung.

Aus Fahrersicht bestehen mit Lenkrad und Brems- bzw. Gaspedal zwei Möglichkeiten, die Fahrdynamik direkt zu beeinflussen. Dies sind Lenken und Beschleunigen bzw. Verzögern. Damit klassifiziert sich das Fahrstreifenwechselmanöver in drei Typen:

- Fahrstreifenwechsel mit Beschleunigung
- Fahrstreifenwechsel mit Verzögerung
- Fahrstreifenwechsel bei konstanter Geschwindigkeit

Alternativ zu einem Fahrstreifenwechsel besteht für den Fahrer die Möglichkeit, auf dem ursprünglichen Fahrstreifen, zu verbleiben. Diese vier Alternativen sind dem Fahrer vom System als Handlungsanweisungen zu präsentieren. Sie werden, in Anlehnung an die aus der Regelungstechnik bekannte Vorsteuerung, als Vorsteuerprogramme bezeichnet. Abbildung 4-6 zeigt die vier Basisvorsteuerprogramme mit einem abstrahierten Geschwindigkeitsverlauf, der Fahrerhandlung und der vom System mittels HMI darzustellenden, entsprechenden Handlungsempfehlung.

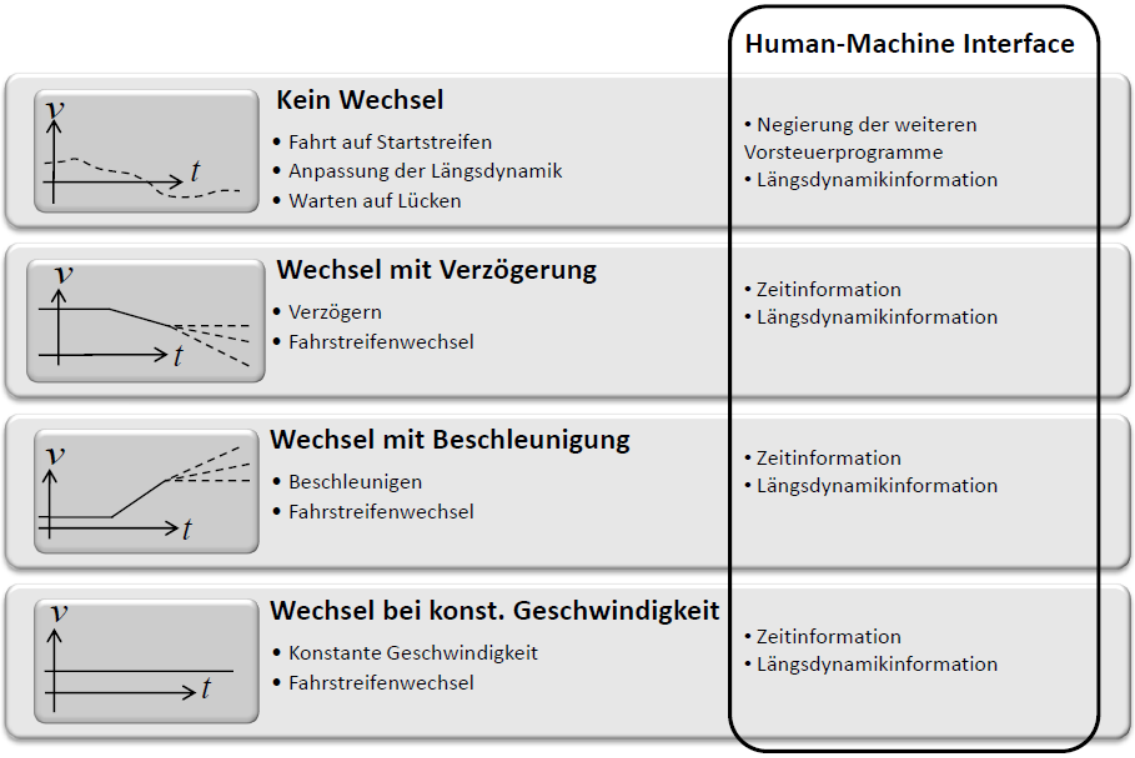


Abbildung 4-6:Vorsteuerprogramme mit Beschreibung des Fahrverhaltens und der darzustellenden Manöverempfehlung

Beispielsweise ist das zweite Vorsteuerprogramm ein Wechsel mit Verzögerung, der sich durch das Verzögern und das Wechseln des Fahrstreifens auszeichnet. Dem Fahrer

[85] Response 3: Code of Practice, 2009

sind die entsprechenden Längsdynamik- und Zeitinformationen mittels HMI darzustellen. Nach dem Wechsel fährt der Fahrer mit konstanter Geschwindigkeit oder er verzögert. Ein Beschleunigen nach dem Verzögern zur Entschärfung der Situation ist ausgeschlossen, da dies für den Fahrer vermutlich sehr anspruchsvoll ist. Genauso ist ein Beschleunigen mit anschließendem Verzögern, um einen Fahrstreifenwechsel in eine Lücke durchführen zu können, sehr anspruchsvoll. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass der Fahrer die Geschwindigkeitsanpassung nach Wechseldurchführung eigenständig durchführen kann. Aus diesen Gründen bleibt ein mehrstufiges Beschleunigen zunächst unberücksichtigt und ist in Abbildung 4-6 nicht dargestellt.

5 Entwicklung des manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenzsystems

In diesem Kapitel werden die Anforderungen in einer Systemarchitektur zusammengefasst. Die Systemmodule der Fahralternativenbewertung und der Fahrerabsichtsdetektion werden gefolgt von dem HMI und der Integration des Systems in den Versuchsträger dargestellt.

5.1 Funktionale Systemarchitektur

Die Entwicklung beruht auf drei Optimierungsrichtungen: der Verbesserung von Komfort, Sicherheit und Fahrerbeanspruchung während der Durchführung eines Fahrstreifenwechsels mittels einer manöverbasierten Assistenzstrategie. Dazu sind die Bestimmung der Manöverempfehlung und die kontinuierliche Ausgabe über eine Mensch-Maschine-Schnittstelle erforderlich. Die Anforderungen sehen des Weiteren vor, dass die Empfehlungen nachvollziehbar und durch den Fahrer umsetzbar sein müssen. Zusätzlich wird eine automatische Detektion der Fahrerintention zur Durchführung eines Fahrstreifenwechsels gefordert, um den Komfort zu maximieren und eine effiziente Assistenz zu gewährleisten (siehe Kapitel 5.4 Fahrerabsichtsdetektion). Als Haupteinsatzgebiet wurden die Autobahn und autobahnähnliche Straßen mit mindestens zwei Richtungsfahrbahnen festgelegt.

Die Anforderungen wurden nach funktionalen Gesichtspunkten aggregiert und in eine logische Systemarchitektur nach Reif[86] überführt, die die Teilfunktionen und deren Vernetzung darstellt und einen Überblick über die zu implementierenden Systemmodule gibt. Die logische Systemarchitektur des manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenten ist in Abbildung 5-1 dargestellt und wird nachfolgend spezifiziert.

[86] Reif: Automobilelektronik, 2006, S. 70

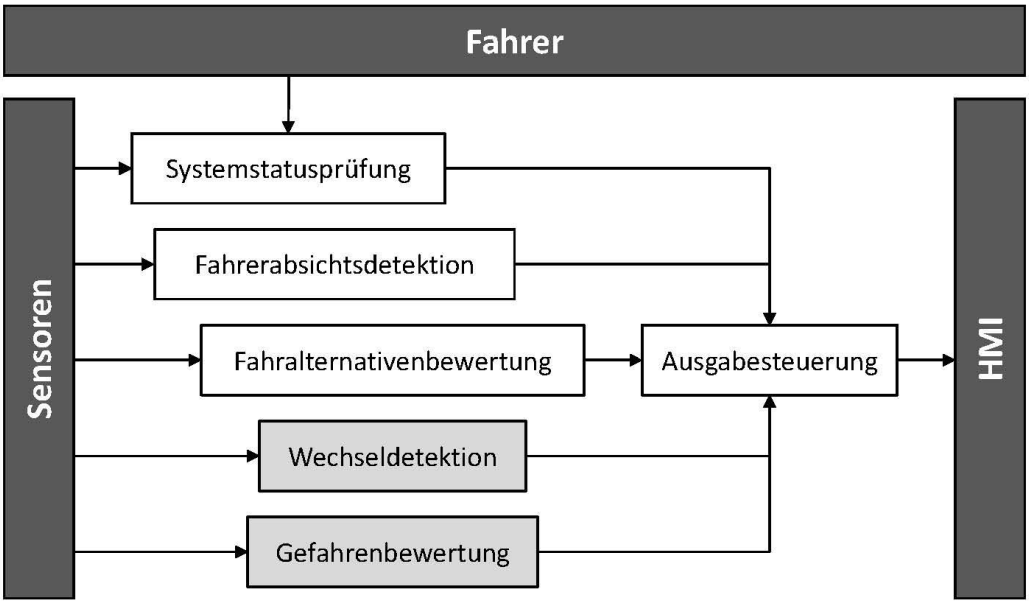


Abbildung 5-1: Logische Systemarchitektur

Basierend auf den Signalen der Umfelderfassung sowie der fahrzeugzustandsbeschreibenden Sensoren (siehe Tabelle 5-1) erfolgen die Verarbeitung mit den Fahrereingabegrößen und die Ausgabe der Empfehlung mittels HMI.

Das Modul der *Systemstatusprüfung* führt eine Eigendiagnose durch und prüft die fehlerfreie Funktion der Hardware sowie den Aktivierungswunsch durch den Fahrer und das Überschreiten einer Mindestgeschwindigkeit von 60 km/h. Sind alle drei Voraussetzungen erfüllt, wird die Ausgabe zugelassen, andernfalls wird die Ursache übermittelt.

Die Ausgabe einer Handlungsempfehlung setzt den Wunsch des Fahrers zur Durchführung eines Fahrstreifenwechselmanövers voraus. Diese Intention wird im Modul *Fahrerabsichtsdetektion* ermittelt.

Die dem Fahrer zur Verfügung stehenden Lücken werden im Modul *Fahralternativenbewertung* ermittelt und die beste Lücke wird nach definierten Kriterien ausgewählt. Außerdem werden die minimal erforderliche Beschleunigung für einen Wechsel, sowie der Wechselbeginn und die maximal verfügbare Wechselzeit ermittelt.

Die beiden innovativen und umfangreichen Module *Fahrerabsichtsdetektion* und *Fahralternativenbewertung* werden in den folgenden Kapiteln ausführlich beschrieben.

Die *Ausgabesteuerung* koordiniert die Informationen der einzelnen Module und steuert die Darstellung der Handlungsempfehlung. Außerdem erfolgt in diesem Modul die Adaption an die Erfordernisse des HMIs.

Diese vier Module bilden den Fokus der Arbeit, der auf dem Machbarkeitsnachweis einer manöverbasierten Assistenz beruht. Die beiden grau hinterlegten Module *Wechseldetektion* und *Gefahrenbewertung* sind für den Nachweis der Machbarkeit nicht erforderlich, da sie bereits zum Stand der Technik zählen und eine zuverlässige Reali-

sierung außer Frage steht. Des Weiteren sind sie zur Validierung mit Probanden nicht erforderlich und werden aus diesen Gründen nur in der Simulation erprobt und nicht im Prototypfahrzeug integriert.

Wird ein Fahrstreifenwechsel durch den Fahrer eingeleitet, so wird dies durch das Modul *Wechseldetektion* erkannt, und die ausgewählte Lücke wird weiterhin durch das Assistenzsystem als beste Lücke mit der entsprechenden zeitlichen und längsdynamischen Information empfohlen. Wird der Wechsel allerdings durch die *Gefahrenbewertung* als gefährlich eingestuft, erfolgt eine Warnung des Fahrers und eine Aufforderung zum Abbruch des Fahrstreifenwechsels.

Die Eingangsdaten des manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenzsystems sind in der nachfolgenden Tabelle 5-1 aufgeführt.

Tabelle 5-1: Eingangsgrößen des Assistenzmodells

Größe	**Quelle**	**Symbol**	**Einheit**
Longitudinaler Objektabstand	Sensorfusion	d_x	m
Lateraler Objektabstand	Sensorfusion	d_y	m
Objektfahrstreifen	Sensorfusion	$lane$	
Objektrelativgeschwindigkeit	Sensorfusion	v_{rel}	m/s
Fahrzeuggeschwindigkeit	Raddrehzahlsensoren	v_{Ego}	m/s
Fahreraktivierungswunsch	Manuelle Eingabe		
Hardwarefehler	Selbstdiagnose		

5.2 Fahralternativenbewertung

Die Zielsetzung der Fahralternativenbewertung und die Umsetzung eines Modells zur Fahrstreifenwechselprädiktion werden im nachfolgenden Kapitel vorgestellt.

5.2.1 Zielsetzung, Vorgehen und Stand der Technik

Um die Manöverempfehlung darzustellen, bewertet das Modul der Fahralternativenbewertung die verfügbaren Lücken unter Berücksichtigung der nachfolgend erläuterten Kriterien und bestimmt die entsprechenden, minimalen Beschleunigungen zum Wechsel des Fahrstreifens in die Lücken. Die beste Lücke bietet einen sicheren Fahrstreifenwechsel und ermöglicht ein schnelles Vorankommen im Verkehr.

Neben dem Vorankommen und der Sicherheit können weitere fahrerspezifische Kriterien wie z.B. Komfort, ausgeprägtes Sicherheitsbedürfnis eines ängstlichen Fahrers, Wirtschaftlichkeit und die Dringlichkeit, die den Zeitraum bis zum Wechsel darstellt, bei der Bewertung des Fahrstreifenwechselmanövers als Kriterien für die beste Lücke

berücksichtigt werden. Den Kriterien können Fahrertypen beispielsweise anhand von Aggressivität, Fahrfertigkeiten, Planungshorizont und Ungeduld[87] zugeordnet werden, Färber[88] teilt Fahrer in die Kategorien defensiv, routiniert und sportlich ein. Psychonomics[89] gliedert die Fahrer in die Gruppen Funktionalist, Ängstlicher, Gelassener, Vorsichtiger, Raser und Frustrierter. Allerdings sind die Gruppen nicht disjunkt und die Zuordnung eines Fahrers zu einer Gruppe ist nicht eindeutig. Des Weiteren ist das Fahrverhalten von der Situation und der Tagesform bzw. der Stimmung des Fahrers abhängig. Aus diesem Grund werden dem Prinzip der Einfachheit folgend lediglich die Kriterien Vorankommen und Sicherheit berücksichtigt. Allerdings besteht die Möglichkeit, die Parameter des Sicherheitskriteriums (siehe Kapitel 5.3.3) in diskreten Schritten durch den Fahrer manuell, ähnlich der Zeitlücke eines ACC-Systems, oder wenn entsprechende Systeme[90] zur Fahrertyperkennung zur Verfügung stehen, automatisch anzupassen und damit einem erhöhten Komfort- oder Sicherheitsbedürfnis Rechnung zu tragen.

Das Ziel der Fahralternativenbewertung ist bei einem Wechsel auf den linken Fahrstreifen die Ermittlung der vordersten, sicheren, erreichbaren Lücke unter Beachtung des Rechtsüberholverbots nach §5 der StVO und die Berechnung der erforderlichen Beschleunigung.

Aufgrund der Relevanz[91] und der Häufigkeit des Auftretens in Stichversuchen wird nachfolgend lediglich das Modell für einen Wechsel auf den linken Fahrstreifen betrachtet. Dennoch wird die Übertragbarkeit auf Fahrstreifenwechsel nach rechts durch Berücksichtigung der Symmetrie gewährleistet. Allerdings sind die Bewertungskriterien in Abhängigkeit der detektierbaren Fahrstreifenwechselursachen neu zu bewerten, da z.B. das Vorankommen gegenüber der Dringlichkeit aufgrund von Autobahnabfahrten, die der Routenverfolgung dienen, an Bedeutung verliert.

Der Fahrstreifenwechselassistent zielt auf die Optimierung des individuellen Verkehrsflusses ab, der auch den allgemeinen Verkehrsfluss verbessern kann. Beispielsweise besteht die Möglichkeit, dass ein Fahrer ohne Assistenzsystem lange auf dem linken Fahrstreifen fährt, da er „fürchtet“, sich hinter einem Lkw „festzufahren“, und mit diesem Verhalten den Verkehr auf dem linken Fahrstreifen behindert, mit einem Fahrstreifenwechselassistenten häufiger nach rechts wechselt und damit den linken Fahrstreifen für schnellere Fahrzeug frei gibt.

---

[87] Choudhury: Modeling Driving Decisions, 2007, S. 49

[88] Färber: Fahrernutzen durch FAS, 2005, S. 148

[89] Psychonomics: Autofahrer-Typen in Deutschland, 1997

[90] Färber: Fahrernutzen durch FAS, 2005, S. 148

[91] Mann: Entwicklung eines Querführungsassistenten, 2008, S. 67 ff.

Aus der Literatur sind zahlreiche Fahrstreifenwechselmodelle bekannt. Die wesentlichen Modelle sind nachfolgend erläutert.

Bascuna[92] definiert eine Kollisionsgrenze, die von den Geschwindigkeiten und Abständen der lückenbegrenzenden Fahrzeuge abhängig ist und von einer sinusförmigen Trajektorie des fahrstreifenwechselnden Fahrzeugs ausgeht.

Li-Sheng Jin[93] bewertet die Sicherheit eines Fahrstreifenwechselmanövers unter der Voraussetzung, dass die Wunschgeschwindigkeit des Fahrers auf dem Zielfahrstreifen bekannt ist. Aus der Wunschgeschwindigkeit wird die erforderliche Beschleunigung bestimmt und die sichere Durchführbarkeit des Wechsels geprüft. Er betrachtet ausschließlich die Längsdynamik der beteiligten Fahrzeuge.

Roelofsen[94] bewertet Fahrstreifenwechsel in fünf Sicherheitsstufen basierend auf dem Anteil der prozentualen Unterschreitung eines Sicherheitsschwellwertes von eintausend durch zufällige Parametervariation erzeugten Fahrstreifenwechseln. Sein Modell beruht auf Li-Sheng Jin und berücksichtigt zusätzliche Variationen der Straßenbedingungen und Reaktionszeiten.

Nach **Jula**[95] gliedert sich der Fahrstreifenwechsel in zwei serielle Phasen: Anpassung der Längsdynamik und Wechsel auf den Zielfahrstreifen. Beim Wechsel werden die Sicherheitsabstände zu allen vier beteiligten Fahrzeugen berücksichtigt.

Dem Modell von **Kanaris**[96] liegt die Annahme zugrunde, dass zunächst ein Verzögern durchgeführt wird, um den Abstand nach vorne zu vergrößern, egal ob Fahrzeuge auf dem Zielfahrstreifen schneller oder langsamer fahren.

Die dargestellten Modelle beziehen sich auf ein oder maximal zwei Situationen und stellen keine allgemeinen Ansätze vor. Sie sind meist für die automatisierte Wechseldurchführung erstellt und berücksichtigen nicht das Fahrerverhalten. Aus diesem Grund wird meist nur die Durchführbarkeit bei bekannter Zielgeschwindigkeit oder bei definierter Beschleunigung bestimmt; eine Bestimmung der zum sicheren Wechsel erforderlichen Beschleunigung wird nicht durchgeführt. Somit steht keine Manöverempfehlung zur Verfügung. Ergänzend zur Zielgeschwindigkeit wird häufig die Zielposition statisch festgelegt. Eine dynamische Beeinflussung der Parameter durch das längsdynamische Verhalten des fahrstreifenwechselnden Fahrers ist nicht berücksichtigt. Alternativen werden nicht geprüft oder bewertet. Auf diese Weise ist die Möglichkeit, eine Lücke passieren zu lassen und in die darauf folgende Lücke zu wechseln, nicht berücksichtigt. Die betrachteten Szenarien weisen teilweise eine geringe Relevanz auf. So geht Kanaris

[92] Bascuana: Lane Change Crash Avoidance, 1995

[93] Jin et al.: Safety Lane Change Model, 2009

[94] Roelofsen et al.: Lane Change Assistance, 2010

[95] Jula et al.: Collision Avoidance for Lane Changing, 1999

[96] Kanaris et al.: Strategies and spacing requirements for lane changing, 2001

davon aus, dass der wechselnde Fahrer zunächst immer verzögert, um ausreichend Abstand zu dem Vorderfahrzeug auf dem Startstreifen aufzubauen.

Das entwickelte Modul der Fahralternativenbewertung gliedert sich in die **Situationsanalyse** und die **Fahrstreifenwechselprädiktion**. Um die sichere Durchführbarkeit und den minimalen Betrag der erforderlichen Beschleunigung zu berechnen, ist die Prädiktion des Geschwindigkeitsverlaufs entsprechend Abbildung 5-2 erforderlich. Dieser ist abhängig von der vorliegenden Situation, die durch die Positionen und Geschwindigkeiten der Fahrzeuge auf dem Start- und Zielfahrstreifen beziehungsweise der Lücke gekennzeichnet ist. Aus diesem Grund definiert zunächst die Situationsanalyse das vorliegende Vorsteuerprogramm, welches wiederum den Fahrstreifenwechsel prädiziert. Der prädizierte Geschwindigkeitsverlauf bestimmt die minimale Beschleunigung und die sichere Durchführbarkeit eines Wechsels. Auf diese Weise wird die beste Lücke identifiziert.

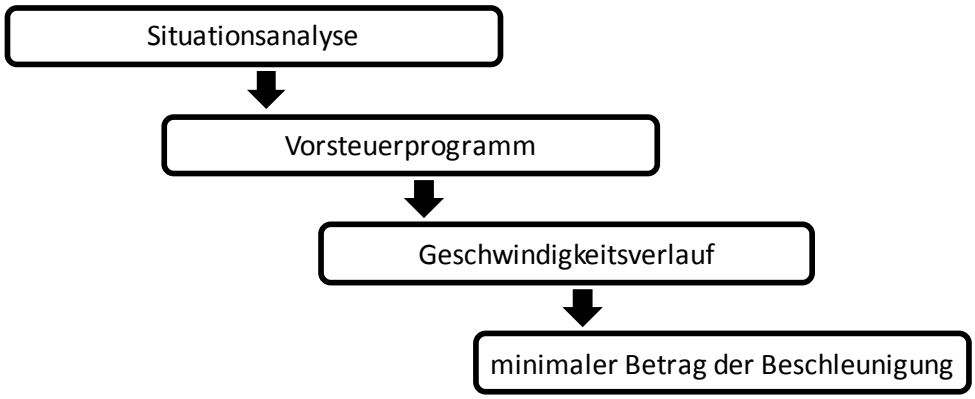


Abbildung 5-2: Funktionsaufbau

5.2.2 Sicherheitskriterium

Zur Beurteilung der sicheren Durchführbarkeit eines Fahrstreifenwechselmanövers ist ein Sicherheitskriterium unerlässlich.

Definition des Sicherheitskriteriums

Die Zeitlücke τ, die Zeit bis zur Kollision *TTC* sowie die zur Kollisionsvermeidung erforderliche Verzögerung D_{req} sind bekannte und bewährte Kriterien[97], deren Eignung situationsabhängig ist. Bewegen sich zwei nacheinander fahrende Fahrzeuge mit annähernd gleicher Geschwindigkeit, so ist der geschwindigkeitsabhängige Abstand, der durch die Zeitlücke ausgedrückt wird, eine Kritikalität beschreibende Größe. Für diese Situation ($v_{rel} \rightarrow 0$) gilt für die *TTC* unabhängig vom Abstand $TTC \rightarrow \infty$, d.h. selbst bei einer durch einen sehr geringen Abstand gefährlichen Situation, signalisiert die *TTC*, dass keine Gefahr besteht. Das entspricht bei sehr kleinen Abständen aber nicht der

[97] Winner: Frontalkollisionsschutzsysteme, 2009, S. 523 ff.

Situation. Die gleiche Betrachtung gilt auch für D_{req}. Liegt allerdings eine Annäherungsfahrt mit einer Relativgeschwindigkeit vor, sind D_{req} und *TTC* Maße für die Sicherheit[98, 99, 100], während die Zeitlücke keine Erkenntnisse über die Gefahr der Situation liefert. Somit kommt auch Vogel[101] zu dem Ergebnis, dass sich zur Sicherheitsbewertung während einer Annäherung die Größen *TTC* und D_{req} eignen, während die Zeitlücke τ zur Sicherheitsbewertung einer Folgefahrt ohne Differenzgeschwindigkeit geeignet ist. Folglich ist als Sicherheitskriterium ein Zusammenhang gesucht, der mindestens zwei der Größen miteinander verknüpft und sowohl Annäherungsszenarien als auch Szenarien ohne Differenzgeschwindigkeit zwischen den betrachteten Fahrzeugen abdeckt. Kriterien, die ein Notausweichen vorsehen, sind zur Fahrstreifenwechselbewertung nicht geeignet, da ein Ausweichen kein vorgesehenes Manöver beim Fahrstreifenwechsel ist.

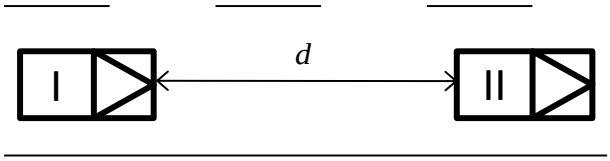


Abbildung 5-3: Zwei aufeinanderfolgende Fahrzeuge I und II

Die gesetzliche Regelung sieht vor, dass der Abstand von einem vorausfahrenden Fahrzeug so groß sein muss, dass hinter ihm gehalten werden kann, wenn es plötzlich gebremst wird.[102] Bezogen auf die in Abbildung 5-3 dargestellte Situation mit den Bremswegen $s_{B,I}$, $s_{B,II}$, dem Abstand d und dem Reaktionsweg s_R ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$s_{B,I} + s_{R,I} \leq d + s_{B,II} \tag{5.1}$$

Mit dem idealisierten Bremsweg (unter Vernachlässigung der Bremsverlustzeit)

$$s_B = \frac{v^2}{2D_B} \tag{5.2}$$

und der Reaktionszeit τ_R ergibt sich für den Sicherheitsabstand d_s, der das Sicherheitskriterium darstellt, die folgende Gleichung:

$$d_s \geq \frac{v_I^2}{2D_{B,I}} + v_I \tau_{R,I} - \frac{v_{II}^2}{2D_{B,II}} \tag{5.3}$$

[98] Fecher: Folgeverhaltens von Pkw-Fahrzeugführern, 2005

[99] Filzek: Abstandsverhalten auf Autobahnen, 2002

[100] Abendroth: Abstandsregelsystem, 2001

[101] Vogel: Comparison of headway time and time to collision, 2003, S. 433

[102] StVO §4, Absatz 1

Parametrisierung des Sicherheitskriteriums

Die Parametrierung des Sicherheitskriteriums erfolgt situationsadaptiv. Die zu definierenden Parameter sind die Reaktionszeit τ_R und die Verzögerungen $D_{B,I}$ und $D_{B,II}$. Abbildung 5-4 zeigt die Nomenklatur der beteiligten Fahrzeuge I-III und das EGO-Fahrzeug EGO. Das vorausfahrende Fahrzeug auf dem Startstreifen wird mit III, das vordere, lückenbegrenzende Fahrzeug wird mit I und das hintere, lückenbegrenzende Fahrzeug wird mit II gekennzeichnet. Beim Fahrstreifenwechsel sind die Sicherheitsabstände zum vorausfahrenden Fahrzeug sowie zu den lückenbegrenzenden Fahrzeugen zu berücksichtigen. Das nachfolgende Fahrzeug auf dem Startfahrstreifen bleibt unberücksichtigt, da die Manöverempfehlung nur Verzögerungswerte empfiehlt, die zu keiner Behinderung des nachfolgenden Fahrzeugs auf dem Startfahrstreifen führen. Die zu treffenden Annahmen zur Parametrisierung für das vorausfahrende Fahrzeug auf dem Startstreifen sowie das vordere, lückenbegrenzende Fahrzeug auf dem Zielfahrstreifen sind identisch, so dass sich lediglich zwei Parametersätze ergeben. Alle drei Sicherheitsabstände lassen sich durch Anwendung von Formel 5.3 auf die relevanten Fahrzeuge bestimmen.

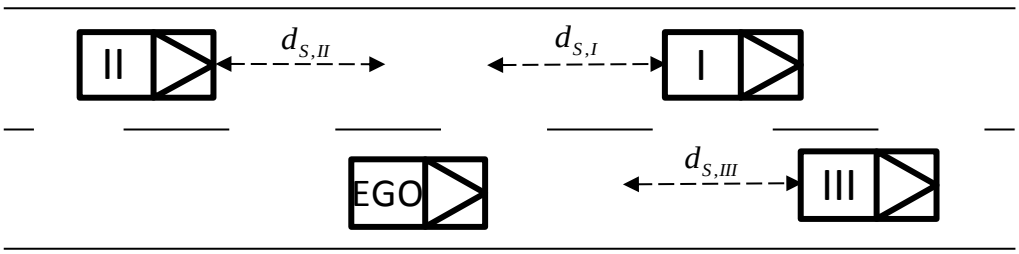


Abbildung 5-4: EGO-Fahrzeug und drei weitere Fahrzeuge (I-III) inklusive der Sicherheitsabstände

Reaktionszeit

Ein Bestandteil des Sicherheitskriteriums ist der Reaktionsweg, der sich aus der Messgröße Fahrzeuggeschwindigkeit und dem Parameter Reaktionszeit zusammensetzt. Einen Überblick über die zahlreichen Studien zur Untersuchung der Reaktionszeit bei Notbremsungen liefern Dettinger[103] und Green[104]. Burckhardt[105] führte Probandenversuche zur Erfassung der Reaktionszeit durch und entwickelte ein Reaktionszeitmodell, das unter dem Begriff „Kölner Modell“ bekannt ist und bis heute die Grundlage für die Unfallanalyse darstellt. Demnach setzt sich die Basisreaktionszeit aus den Zeitspannen zur Informationsverarbeitung, zum Umsetzen des Fußes und der Ansprech- und der Schwelldauer der Bremsanlage zusammen. Die Blickzuwendungszeit wird nicht berücksichtigt, da sich das vorausfahrende Fahrzeug unmittelbar im Blickfeld des Fahrers

[103] Dettinger: Reaktionsdauer Notbremsvorgängen, 2008, S. 180 ff.

[104] Green: How long to stop?, 2000

[105] Burckhardt: Reaktionszeiten bei Notbremsvorgängen, 1985

befindet. Der Median der Basisreaktionszeit bei den von Burckhardt durchgeführten Versuchen lag bei 0,86 s.

Neue mathematische Auswertungen der Rohdaten von Burckhardt ergeben minimale Fahrerreaktionszeiten von 0,3 bis 0,5 s für das 2 %-Perzentil in Abhängigkeit der Auswertemethode. Das 98 %-Perzentil der Reaktionszeiten liegt zwischen 1,0 und 1,1 s.[106]

Stanczyk[107] ermittelte 2008, dass die Reaktionszeit von der von ihm definierten Risikozeit abhängig ist. Die Risikozeit beschreibt die Dauer vom Erblicken des Hindernisses durch den Fahrer bis zu einem eventuellen Zusammenstoß. Sie steht dem Fahrer zur Einleitung einer Abwehrhandlung zur Verfügung. In Fahrbahn- und Simulatorversuchen mit Probanden wurde ein linearer Zusammenhang zwischen Reaktionszeit und Risikozeit nachgewiesen.

Nach der Ergebnisinterpretation von Stanczyk laufen die Entscheidungen des Fahrers langsamer ab bzw. er nimmt sich mehr Zeit, wenn der Fahrer spürt, dass er über mehr Zeit verfügt. Der Median der Reaktionszeit bei einer Risikozeit von 1 s liegt bei den Realtests bei 0,73 s und für die Simulatorversuche bei 0,47 s. Die Fahrer waren bei den Versuchen nicht auf die Situation vorbereitet und mussten zwischen den Handlungsoptionen Bremsen und Lenken oder deren Kombination entscheiden.

Abschließend kommt Stanczyk zu dem Ergebnis, dass die Reaktionszeit von der konkreten Situation abhängig ist, die beispielsweise durch die Risikozeit charakterisiert wird.[108] Green ergänzt die Erwartungshaltung des Fahrers als weiteren Parameter der Reaktionszeit neben der Dringlichkeit der Situation.[109]

Beim Fahrstreifenwechselmanöver ist der Wechselnde im Vergleich zur normalen Autobahnfahrt vermutlich sehr aufmerksam und konzentriert. Die Handlungsoption Bremsen ist nicht überraschend gefordert, sondern der Fahrer ist auf eine solche Reaktion vorbereitet. Der Nachfolgende auf dem Zielfahrstreifen wird durch das Setzen des Fahrtrichtungsanzeigers auf den bevorstehenden Wechsel vorbereitet. Er hat somit die Möglichkeit seine Geschwindigkeit anzupassen, bevor der Wechselnde die Fahrbahnmarkierung quert. Aus diesem Grund wird für das Sicherheitskriterium eine Reaktionszeit für den Fahrer des hinteren, lückenbegrenzenden Fahrzeugs $\tau_{R,II}$ von 0,5 s und eine Reaktionszeit für den Fahrer des EGO-Fahrzeugs $\tau_{R,EGO}$ von 0,4 s angenommen. Die Festlegung auf diese Werte ermöglicht eine Grundparametrierung des Algorithmus, beschränkt aber in keiner Weise die folgenden Ableitungen, da sie selbstverständlich auch für andere Werte gelten, die z.B. durch Testfahrten oder Probandenversuche festgelegt werden können.

[106] Döhler et al.: Reaktionszeiten, 2008, S. 299 ff.

[107] Stanczyk et al.: Reaktionszeit in Unfallrisikosituationen, 2008, S. 241 ff.

[108] Stanczyk et al.: Reaktionszeit in Unfallrisikosituationen, 2008, S. 245

[109] Green: How long to stop?, 2000, S. 213

Verzögerung

Das Sicherheitskriterium ist auch von der Verzögerungsfähigkeit D_B abhängig. Die maximale Vollverzögerung bei trockener Witterung und einem entsprechenden Reibwert von 1,0 beträgt ca. 10 m/s². Diese Verzögerungsfähigkeit steht dem Fahrer des EGO-Fahrzeugs und den weiteren Beteiligten beim Verzögern auf ein vorausfahrendes Fahrzeug zur Verfügung. Das Sicherheitskriterium setzt das Nutzen der vollen Verzögerungsfähigkeit durch den Fahrer voraus. Dieser muss das Bremspedal mit ausreichender Kraft betätigen oder den Bremsassistent aktivieren.

Zusammenfassung der Parametrisierung des Sicherheitskriteriums

Tabelle 5-2 zeigt die definierten Parameter des Sicherheitskriteriums im Überblick.

Tabelle 5-2: Parametrisierung des Sicherheitskriteriums

Bezeichnung	**Zeichen**	**Wert**
Reaktionszeit	$\tau_{R,EGO}$	0,4 s
	$\tau_{R,II}$	0,5 s
Verzögerungsfähigkeit	$D_{B,EGO}$	10 m/s²
	$D_{B,I}$, $D_{B,II}$, $D_{B,III}$	10 m/s²

Abbildung 5-5 zeigt den Sicherheitsabstand mit den Basisparametern aus Tabelle 5-2 in Abhängigkeit der Messgrößen EGO-Geschwindigkeit und der Messgröße Differenzgeschwindigkeit zu dem vorausfahrenden Fahrzeug III. Mit zunehmender EGO-Geschwindigkeit und zunehmender Differenzgeschwindigkeit steigt der Sicherheitsabstand.

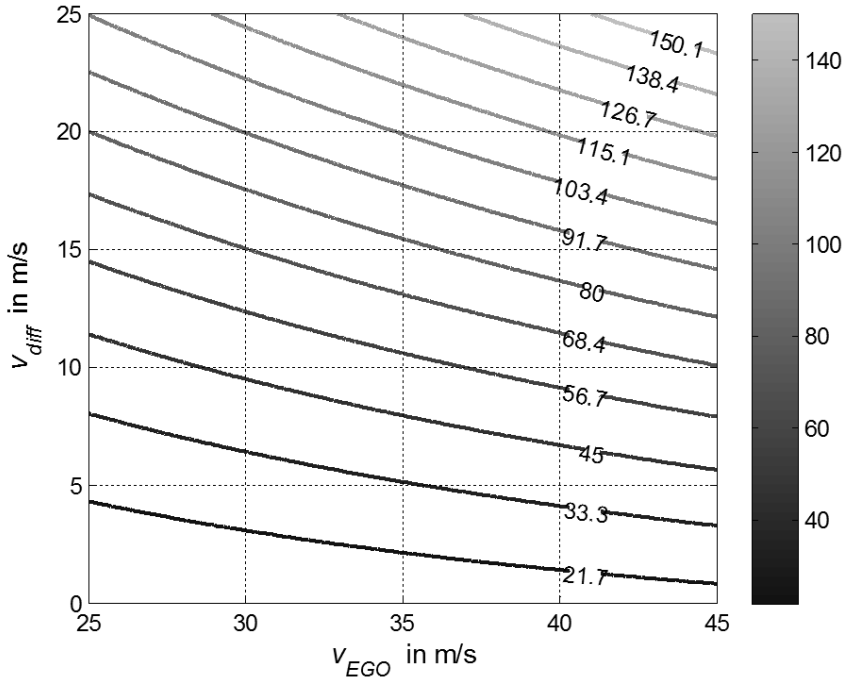


Abbildung 5-5: Sicherheitsabstand in Abhängigkeit der Geschwindigkeit v_{EGO} des Versuchsfahrzeugs und der Differenzgeschwindigkeit v_{diff} ($v_{diff} = v_{EGO} - v_{III}$)

Einfluss der Parameter des Sicherheitskriteriums

Abbildung 5-6 stellt das Sicherheitskriterium in Abhängigkeit der häufig zur Sicherheitsbewertung[110,111,112,113] verwendeten Time-to-Collision und der Zeitlücke dar. Die abgebildeten Grenzkurven trennen den gefährlichen Bereich links der Kurve von dem sicheren Bereich rechts der Kurve. Das dargestellte Szenario besteht Abbildung 5-6 entsprechend aus dem EGO-Fahrzeug, das sich mit einer Geschwindigkeit von 100 km/h bewegt, und einem vorausfahrenden Fahrzeug III. Die Differenzgeschwindigkeit variiert von 0 bis 90 km/h. Die durchgezogene, schwarze Linie zeigt die Grenzkurve mit den festgelegten Basisparametern aus Tabelle 5-2. Die weiteren Grenzkurven zeigen Variationen einzelner Parameter entsprechend Tabelle 5-3. Wie die gestrichelte, dunkle Kurve zeigt, wird bei Variation der Verzögerungsfähigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs III von 10 m/s² auf 8m/s² die Grenzkurve zu kleineren Zeitlücken verschoben. Wird die Reaktionszeit erhöht, verschiebt sich die Grenzkurve zu größeren Zeitlücken parallel zur ursprünglichen Kurve wie der gepunktete Verlauf zeigt. Der Schnittpunkt mit der Abszisse zeigt die Reaktionszeit, wenn die Verzögerungsfähigkeit beider Fahrzeuge identisch ist. Verringert sich die Verzögerungsfähigkeit des EGOs von 10 auf 8 m/s², verschiebt sich die Kurve zu größeren Zeitlücken wie der strichpunktierte Verlauf zeigt.

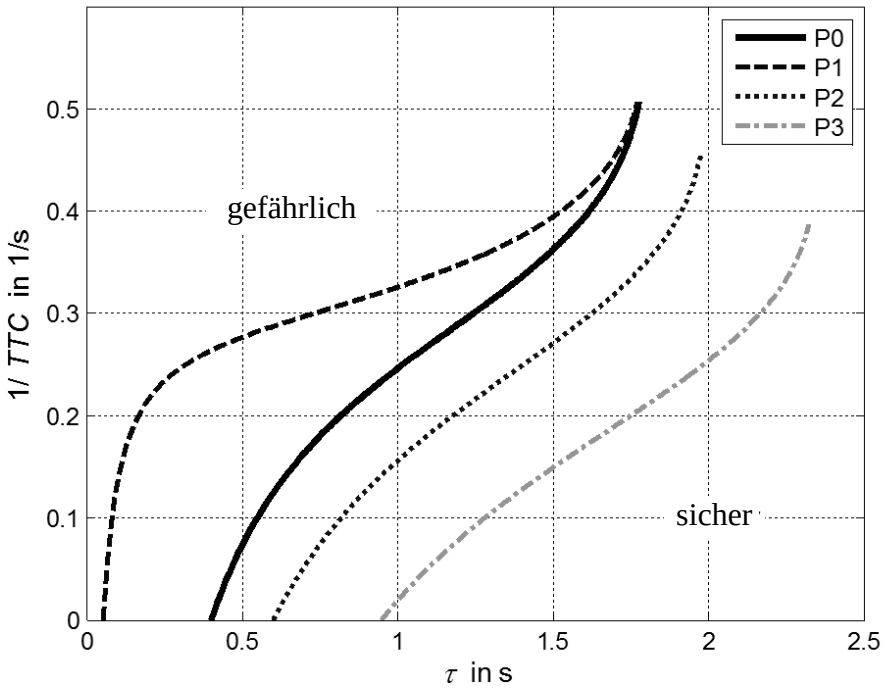


Abbildung 5-6: Sicherheitskriterium in Abhängigkeit von τ und $1/TTC$ mit Parametervariation

[110] Fastenmeier et al.: Spurwechselanalyse, 2001

[111] Kodaka et al.: Rear-end Collision Velocity Reduction System, 2003

[112] Winner: Frontalkollisionsschutzsysteme, 2009, S. 523 ff.

[113] International Standardization Organization: ISO 17387: LCDAS, 2008

Tabelle 5-3: Parametervariationen

Beschreibung	**Variable**	$D_{B,PV}$	$D_{B,III}$	$\tau_{R,EGO}$
Basisparametrisierung	P0	-10 m/s²	-10 m/s²	0,4 s
Parametervariation 1	P1	-10 m/s²	-8 m/s²	0,4 s
Parametervariation 2	P2	-10 m/s²	-10 m/s²	0,6 s
Parametervariation 3	P3	-8 m/s²	-10 m/s²	0,4 s

Vergleich des Sicherheitsabstands mit dem zugemuteten Abstand für das nachfolgende Fahrzeug auf dem Zielfahrstreifen

Gleichung 5.3 definiert den einzuhaltenden Abstand sowohl für den vorausfahrenden Verkehr auf dem Start- und auf dem Zielfahrstreifen als auch für den nachfolgenden Verkehr auf dem Zielfahrstreifen aus Sicherheitsgründen. Für den nachfolgenden Verkehr existiert jedoch ein weiteres Kriterium, das den minimalen Abstand definiert. Der fahrstreifenwechselnde Fahrer mutet dem nachfolgenden Verkehr eine Verzögerung zu. Verhält er sich kooperativ, ist der Betrag der zugemuteten Verzögerung minimal. Aus diesem Grund wird als weiteres Kriterium das Komfortkriterium definiert. Das Komfortkriterium berücksichtigt den Betrag der minimalen, zugemuteten Verzögerung $D_{charged,II}$, die Differenzgeschwindigkeit v_{diff}, die Reaktionszeit $\tau_{R,II}$ des nachfolgenden Fahrers II und den minimalen, zugemuteten Abstand nach der Verzögerung $\tau_{reasonable,II}$ sowie die Geschwindigkeit des nachfolgenden Fahrzeugs v_{II}. Unter der Voraussetzung, dass sich das EGO-Fahrzeug mit konstanter Geschwindigkeit bewegt, ergibt sich der folgende Zusammenhang.

$$d_{komfort} = \frac{v_{diff}^2}{2D_{charged,II}} + \left(\tau_{R,II} + \tau_{reasonable,II}\right) v_{II} \qquad 5.4$$

Der Betrag der maximalen, akzeptierten Verzögerung wird der Norm für Adpative Cruise Control ISO 22179 entnommen. Die Funktionsgrenze von ACC liegt bei Geschwindigkeiten von über 20 m/s bei D_{max}=3,5 m/s². Diese Verzögerung wird dem Fahrer des nachfolgenden Fahrzeugs II zugemutet. Die Reaktionszeit wird auf 0,5 s festgelegt. Die minimale Zeitlücke nach der Verzögerung ist ebenfalls auf 0,5 s festgelegt. Während dieses Annäherungsvorgangs wird dem nachfolgenden Fahrer ein Unterschreiten des durch die Bußgeldgrenze[114] festgelegten Abstands von 0,9 s zugemutet, da keine stationäre Situation vorliegt und er die Möglichkeiten hat, den Abstand nach der Annäherung zu erhöhen.

[114] Kraftfahrt-Bundesamt: Bundeseinheitlicher Tatbestandskatalog, 2009

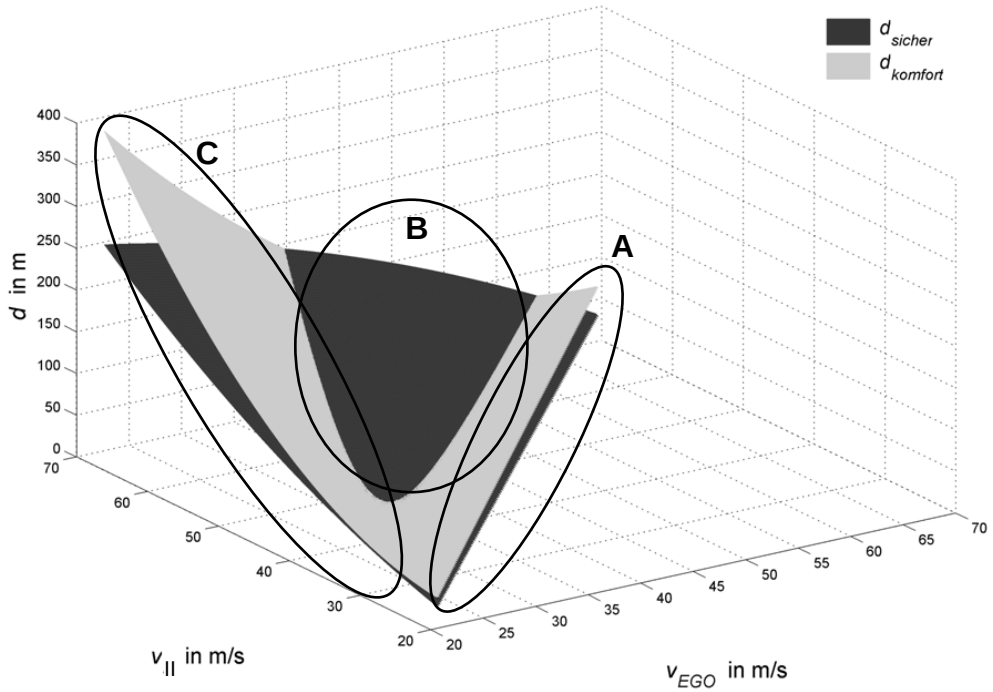


Abbildung 5-7: Vergleich der Abstände des einscherenden EGO-Fahrzeugs und des hinteren, lückenbegrenzenden Fahrzeugs II nach Sicherheitskriterium $\left(D_{B,II} = 10 \text{ m/s}^2, D_{B,EGO} = 0 \text{ m/s}^2, \tau_{R,II} = 0,4 \text{ s}\right)$ und Komfortkriterium $\left(D_{charged,II} = 3,5 \text{ m/s}^2, \tau_{R,II} = 0,5 \text{ s}, \tau_{reasonable,II} = 0,5 \text{ s}\right)$

Abbildung 5-7 stellt sowohl die Mindestabstände basierend auf dem Sicherheits- als auch auf dem Komfortkriterium in einem Geschwindigkeitsbereich von 80 bis 200 km/h für die Annäherung $\left(v_{II} \geq v_{EGO}\right)$ dar. Drei Bereiche (A, B, C) werden nachfolgend diskutiert. In Bereich A sind die Geschwindigkeiten der Fahrzeuge annähernd gleich. Bei kleinen Relativgeschwindigkeiten sind die Abstände nach dem Komfortkriterium größer, da dieses Kriterium eine Gesamtzeitlücke von 1 Sekunde und das Sicherheitskriterium lediglich eine Zeitlücke von 0,5 s berücksichtigt. Im Bereich mittlerer Relativgeschwindigkeiten (Bereich B) ist das Sicherheitskriterium konservativer, da das Komfortkriterium eine Verzögerung von 3,5 m/s² berücksichtigt, während das Sicherheitskriterium, wie Formel 5.3 und Abbildung 5-10 zeigen, die zugemutete Verzögerung mit der Relativgeschwindigkeit erhöht. Die maximale Differenz im Bereich II des dargestellten Diagramms beträgt 27,6 m bei einer Geschwindigkeit des Fahrzeugs II von 200 km/h und einer Geschwindigkeit des EGO-Fahrzeugs von 185,6 km/h. Bei größeren Differenzgeschwindigkeiten (Bereich C) steigt die zugemutete Verzögerung des Sicherheitskriteriums auf Werte, die größer als 3,5 m/s² sind. Aus diesem Grund ist der Sicherheitsabstand, berechnet nach dem Sicherheitskriterium, kleiner als der Sicherheitsabstand, der durch das Komfortkriterium bestimmt wird.

Neben der Sicherheit ist auch die Akzeptanz durch den Fahrer zu bewerten. Fastenmeier[115] bewertete subjektiv 1095 Fahrstreifenwechsel auf Autobahnen, die von Probanden durchgeführt wurden. Er vermutete, dass eine Zeitlückengrenze von 1,2 s die Schwelle zwischen gefährlichem und ungefährlichem Fahrstreifenwechsel charakterisiert. Dieser Schwellwert erwies sich in den Fahrversuchen als wesentlich zu konservativ[116]. Die subjektive Einschätzung nach Fastenmeier bewertet einen Fahrstreifenwechsel kritisch, wenn eine Zeitlücke von 0,6 s bzw. eine Zeitlücke von 1,2 s bei einer TTC von weniger als 3 s unterschritten wird. Die Fahrer unterschritten in 20 % der 1095 Fahrstreifenwechsel diese von Beobachtern gesetzten Schwellwerte.

Das Komfortkriterium betont in den meisten Geschwindigkeitsbereichen die Sicherheit und die kooperative Fahrweise. Allerdings zeigte Fastenmeier in seiner Probandenstudie, dass es mindestens in den Bereichen A und C nicht das reale Verkehrsgeschehen wiederspiegelt. Ein Fahrstreifenwechselassistent mit einem konservativen Kriterium wird viele Lücken ausschließen, die die Fahrer als geeignet einstufen. Diese Diskrepanz zwischen der Erwartungshaltung des Fahrers und der Systemfunktion wird die Akzeptanz für das System reduzieren. Des Weiteren wird vermutet, dass mit steigender Fahrgeschwindigkeit die Akzeptanz für größere, zugemutete Verzögerung zunimmt. Da die Akzeptanz ein wichtiges Bewertungskriterium ist und unter Voraussetzung der beschriebenen Annahme, wird das Komfortkriterium zur Berechnung des minimalen Abstands zu einem nachfolgenden Fahrzeug verworfen und stattdessen das Sicherheitskriterium verwendet.

Abschließend bleibt die Frage: Welche Verzögerung wird dem nachfolgenden, schnelleren Fahrer zugemutet, wenn das EGO-Fahrzeug mit konstanter Geschwindigkeit fährt und der Fahrer des nachfolgenden Fahrzeugs II die Kollision verhindern möchte. Um diese Frage zu beantworten, wird Gleichung 5.4 nach der zugemuteten Verzögerung aufgelöst und die nach dem Verzögern vorliegende Zeitlücke zu Null gesetzt. Damit ergibt sich für die Verzögerung:

$$D_{charged,II} = \frac{v_{rel}^2}{2\left(d_{sicher} - \tau_{R,II} v_{II}\right)} \tag{5.5}$$

Abbildung 5-8 zeigt die zugemutete Verzögerung in Abhängigkeit der Relativgeschwindigkeit. Die maximale Verzögerung tritt bei maximaler Differenzgeschwindigkeit auf. Als Extremfall wird von einer Geschwindigkeit des wechselnden EGO-Fahrzeugs mit 80 km/h und einem hinteren, lückenbegrenzenden Fahrzeugs II mit 250 km/h betrachtet. Dementsprechend stellt die Abbildung die Relativgeschwindigkeit von 0 bis maximal 47,2 m/s (170 km/h) dar. Die erforderliche Verzögerung verringert sich mit zunehmender Differenzgeschwindigkeit. Bei einer Geschwindigkeit des nachfol-

[115] Fastenmeier et al.: Spurwechselanalyse, 2001

[116] Fastenmeier et al.: Spurwechselanalyse, 2001, S. 22

genden Fahrzeugs von ca. 166 km/h (46 m/s) beziehungsweise einer Relativgeschwindigkeit von ca. 86 km/h (24 m/s) sinkt die zugemutete Verzögerung unter den Grenzwert der ACC Norm 22179[117] von 3,5 m/s². Wenn der fahrstreifenwechselnde Fahrer mit 80 km/h den Fahrstreifen wechselt, muss der sich von hinten nähernde Fahrer bei 200 km/h mit 4,5 m/s² verzögern, um eine Kollision zu vermeiden. In Deutschland gilt nach der Richtgeschwindigkeitsverordnung von 1978 auf Autobahnen eine Richtgeschwindigkeit von 130 km/h. Demnach kann bei Unfällen eine Mitschuld aufgrund erhöhter Betriebsgefahr angerechnet werden, wenn die Richtgeschwindigkeit überschritten wird. Aus diesem Grund erscheint eine Verzögerung von weniger als -3,5 m/s² genauso akzeptabel wie die minimale Verzögerung bei einem Wechsel mit 80 km/h auf einen Fahrstreifen mit einem Fahrzeug, das 250 km/h fährt. Diese beträgt -5,1 m/s².

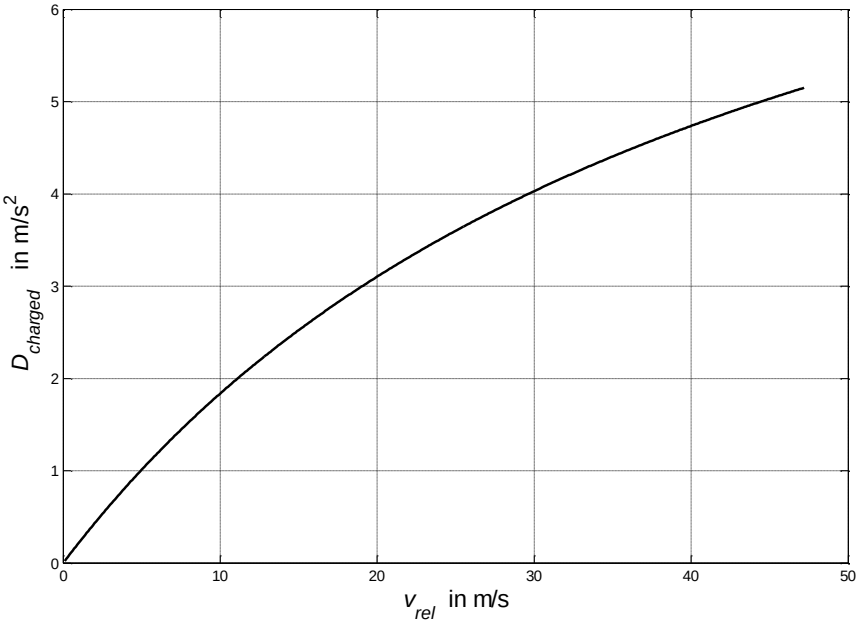


Abbildung 5-8: Zugemutete Verzögerung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit des hinteren, lückenbegrenzenden Fahrzeugs bei einer Geschwindigkeit des EGO-Fahrzeugs von 80 km/h

Sicherheitskriterium im zeitlichen Verlauf des Fahrstreifenwechsels

Wird die Belegung der Fahrstreifen während eines Fahrstreifenwechselmanövers betrachtet, setzt sich ein Wechsel aus drei Phasen zusammen:

1. Fahrt auf dem Startstreifen
2. Fahrt auf dem Start- und auf dem Zielfahrstreifen
3. Fahrt auf dem Zielfahrstreifen

Während der Fahrt auf dem Startstreifen ist lediglich der Sicherheitsabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug III einzuhalten. In der zweiten Phase befindet sich das EGO-Fahrzeug sowohl auf dem Start- als auch auf dem Zielfahrstreifen. Folglich sind wäh-

[117] ISO 22179: full speed range adaptive cruise control

rend der zweiten Phase die Sicherheitsabstände sowohl zu dem vorausfahrenden Fahrzeug III auf dem Startstreifen, dem vorausfahrenden Fahrzeug I und dem nachfolgenden Fahrzeug II, die sich beide auf dem Zielfahrstreifen bewegen, einzuhalten. In der dritten Phase befindet sich das EGO-Fahrzeug auf dem Zielfahrstreifen in einer sicheren oder vom Fahrer leicht beherrschbaren Situation. Aus diesem Grund bleibt diese Phase bei der weiteren Betrachtung unberücksichtigt. Die Sicherheit während der ersten und zweiten Phase wird bei der Prädiktion des Fahrstreifenwechsels berücksichtigt. Um die Möglichkeit eines Fahrstreifenwechsels auch in sehr kleine und schnelle Lücken zu prüfen, sind die minimalen Zeitdauern der einzelnen Phasen gesucht.

Die Dauer der ersten Phase, die sich als Annäherung des Fahrzeugs an die Fahrstreifenrandmarkierung darstellt, lässt sich dynamisch basierend auf der Time-to-Line Crossing[118] (TLC) und Odometrie[119] berechnen. Für den Nachweis der Machbarkeit der manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenz ist eine Implementierung von aus dem Stand der Technik bekannten und bewährten TLC-Modelle nicht notwendig. Aus diesem Grund und um Fehlereinflüsse eines Modells zur TLC-Bestimmung auszuschließen, wird eine konstante Dauer für die erste Phase angenommen. Da die Dauern der einzelnen Phasen im Weiteren als Schwellenwerte genutzt werden, werden sie mit Großbuchstaben bezeichnet. Die Fahrstreifenbreite von Autobahnen und autobahnähnliche Straßen beträgt zwischen 3,25 m und 3,75 m.[120] Unter der Annahme, dass sich das EGO-Fahrzeug zu Beginn der ersten Phase in der Mitte des Fahrstreifens befindet und das Ende der ersten Phase, als Überfahren der Fahrstreifenmittemarkierung mit der Karosserie definiert ist, beträgt der laterale Abstand $s_{lateral}$ bei einer mittleren Fahrstreifenbreite von 3,5 m und einer Fahrzeugbreite von 1,84 m[121] 0,83 m. Unter der Annahme, dass sich der Abstand zur Markierung bei bestehender Absicht verringert, wird ein lateraler Abstand von 0,5 m zur Berechnung verwendet.

Die minimale Dauer zum Erreichen der Fahrbahnmarkierung T_{Phase1} beträgt

$$T_{Phase1} = \sqrt{\frac{2s_{lateral}}{a_y}} + \tau_s . \tag{5.6}$$

Mit einer mittleren Querbeschleunigung der ersten Phase von $a_y = 1\,\mathrm{m/s^2}$ und einer Lenkreaktionszeit von $\tau_s = 0{,}1\,\mathrm{s}$ berechnet sich die Dauer der ersten Phase zu $T_{Phase1} = 1{,}1\,\mathrm{s}$.

[118] Mammar et al.: TLC Algorithms, 2006

[119] Schmitt, Habenicht, Isermann: Odometrie und Manövererkennung, 2009

[120] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Straßenanlagerichtlinie - Teil Querschnitt, 1996

[121] Technisches Datenblatt Honda Accord Tourer, 2010

Zur Bestimmung der zweiten Phase T_{Phase2} wurden jeweils zehn zufällig ausgewählte Fahrstreifenwechsel von neun Probanden aus den Stichversuchen, die im ersten Projektjahr durchgeführt wurden, ausgewertet. Der Mittelwert der 25 %-Perzentils jedes Fahrers, das ausgewertet wurde, um eine Durchführbarkeit sicher ausschließen zu können, ergab eine Dauer des zweiten Zeitabschnitts von $T_{Phase2} = 1,68\ \text{s}$.

Damit ergibt sich eine minimale Fahrstreifenwechseldauer von 2,78 s und eine Dauer des parallelen Befahrens von Start- und Zielfahrtstreifen von 1,68 s. Ein Vergleich mit Literaturwerten ist schwierig, da der Beginn und das Ende der Fahrstreifenwechselphase unterschiedlich und teilweise gar nicht definiert sind. Sporrer[122] gibt die Dauer eines Notausweichens bei 50 km/h, das vom ersten Einlenken bis zum Ende des Zurücklenkens dauert, mit 2,5 s an. Ein Fahrstreifenwechsel zum Einleiten oder Abschließen eines Überholvorgangs dauert nach Sporrer mindestens 3,1 s. Fastenmeier[123] gibt den Mittelwert der Fahrstreifenwechseldauer von 1095 Fahrstreifenwechseln auf Autobahnen mit 2,5 s an. Dabei definiert er den Fahrstreifenwechselbeginn als das Überfahren der Markierung und das Ende als das Befahren des Zielfahrstreifens mit allen vier Rädern.

5.2.3 Situationsanalyse

Das Modul „Situationsanalyse“ identifiziert das Szenario, das durch die Abstände und Relativgeschwindigkeiten zu den umgebenden Fahrzeugen beschrieben wird, und wählt das zugehörige Vorsteuerprogramm aus. Basierend auf dem definierten Vorsteuerprogramm wird der Fahrstreifenwechsel prädiziert.

In Ergänzung zur Nomenklatur der Fahrzeuge und Sicherheitsabstände aus Abbildung 5-6 werden an dieser Stelle die Abstände eingeführt und in Abbildung 5-9 dargestellt. Diese werden mit d_I bzw. d_{II} entsprechend der Fahrzeugnummerierung bezeichnet und beziehen sich auf das fahrzeugfeste Koordinatensystem des EGO-Fahrzeugs (x_v, y_v), dessen Ursprung sich an der Fahrzeugfront, in der Mittelebene des Fahrzeugs (x-, z-Ebene) befindet.

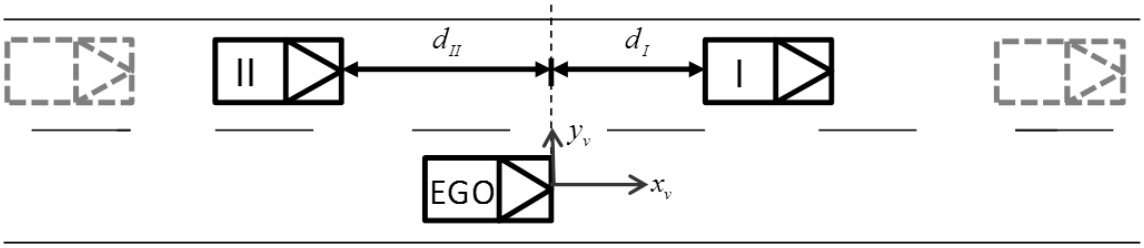


Abbildung 5-9: Nomenklatur der Distanzen

Werden mehrere Lücken betrachtet, sind diese mit Ziffern entsprechend der Distanz zum EGO-Fahrzeug nummeriert und die Lückennummer wird in Klammern zur jewei-

[122] Sporrer et al.: Spurwechsel im Straßenverkehr, 1998, S. 10

[123] Fastenmeier et al.: Spurwechselanalyse, 2001

ligen Variablen hinzugefügt, z.B. bezeichnet die Variable $d_{II}(3)$ die Distanz zum hinteren, lückenbegrenzenden Fahrzeug der dritten Lücke.

Der Lückenschwerpunkt d_{GAP}, der mit dem Mittelpunkt zwischen den lückenbegrenzenden Fahrzeugen identisch ist ($d_{GAP} = (d_I + d_{II})/2$), definiert als Referenzpunkt den Abstand zwischen Lücke und EGO-Fahrzeug und der Mittelwert der Relativgeschwindigkeiten der lückenbegrenzenden Fahrzeuge legt die Lückenrelativgeschwindigkeit v_{GAP} fest. Auf diese Weise sind die lückenspezifischen Eigenschaften in einer Liste, ähnlich einer aus der Umfelddatenfusion bekannten Objektliste, zusammengefasst. Die Parameter Abstand und Geschwindigkeit sind in drei Wertebereiche (>0, =0, <0) gegliedert. Durch systematische Kombination existieren somit insgesamt 9 Situationen. Diese sind in Abbildung 5-10 mit den entsprechenden, geforderten Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverläufen veranschaulicht.

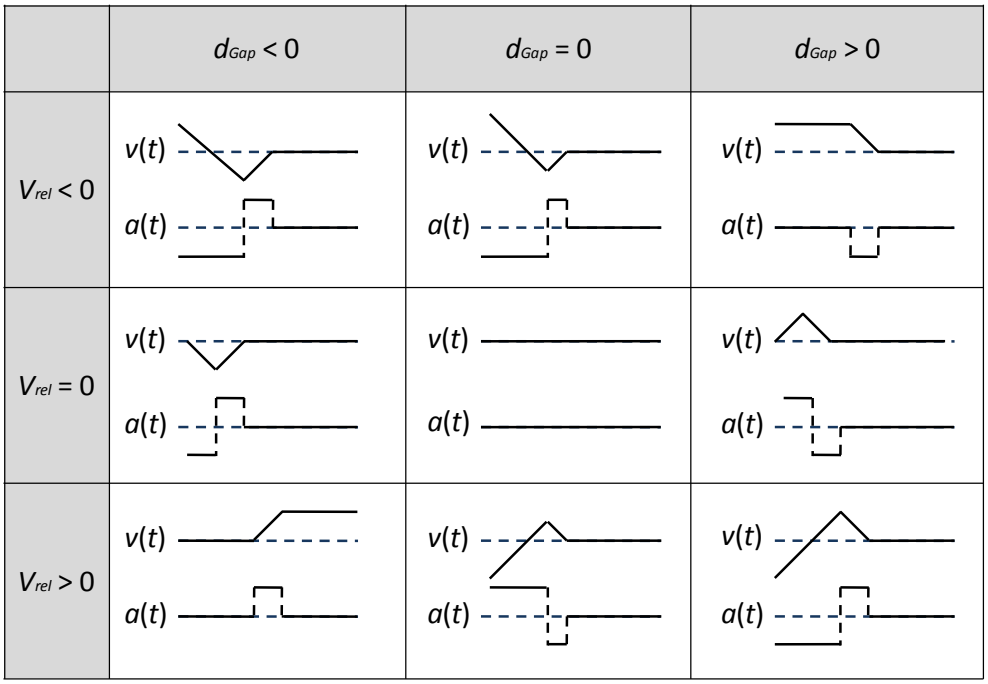


Abbildung 5-10: Szenarien mit skizzierten Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverläufen über der Zeit

Eine derartige Situationsanalyse folgt dem MOBIL-Prinzip[124] (Minimizing overall braking deceleration induced by lane changes), das den globalen Verkehrsfluss optimiert. Beispielsweise wird dem Fahrer ein Beschleunigen empfohlen, wenn sich die Lücke neben ihm befindet $(d_{Gap} = 0)$ und schneller ist $(v_{rel} > 0)$. In dieser Situation kann aber auch ein Wechsel mit konstanter Geschwindigkeit möglich sein, wenn der nachfolgende Fahrer zum Verzögern gezwungen wird. Für die Entwicklung des Fahrstreifenwechselassistenten steht der individuelle Fahrer des EGO-Fahrzeugs im Vordergrund und dem nachfolgenden Verkehr wird eine Verzögerung zugemutet. Aus diesem

[124] Treiber et al.: Lane-Changing Decisions with MOBIL, 2009

Grund wird keine Synchronisierung der Geschwindigkeiten zwischen Lücke und Fahrzeug angestrebt, sondern der Wechsel erfolgt in einen sicheren Zustand, der durch das Sicherheitskriterium beschrieben wird.

Des Weiteren ist eine Synchronisierung mit dem Lückenschwerpunkt nicht erforderlich, da der Fahrer bei einem Fahrstreifenwechsel vermutlich nicht diese Position anstreben wird, sondern beispielsweise bei einem Wechsel auf den schnelleren, linken Fahrstreifen versucht, möglichst auf einen angemessenen Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug aufzuschließen. Demnach sind die Wechselposition und die relevante Relativgeschwindigkeit nicht vom Lückenschwerpunkt, sondern vom näheren Fahrzeug auf dem Zielfahrstreifen abhängig.

Somit erfolgt die Analyse der Situation in Abhängigkeit der relativen Position der Lücke unter der Berücksichtigung des Sicherheitsabstandes und der Geschwindigkeit des lückenbegrenzenden Fahrzeuges mit der kürzesten Distanz zum EGO-Fahrzeug. Eine Lücke wird durch die Sicherheitsabstände zu den lückenbegrenzenden Fahrzeugen limitiert. Diese Grenzen werden im fahrzeugfesten Koordinatensystem mit den Variablen $x_{S,I}, x_{S,II}, x_{S,III}$ bezeichnet und bestimmen unter Berücksichtigung der EGO-Fahrzeuglänge d_{EGO} die Lückenposition. Die Lücke besitzt, wie in Abbildung 5-11 dargestellt, eines der drei Attribute „vor“, „neben“ oder „hinter“ dem EGO-Fahrzeug.

Die Lücke befindet sich **vor** dem EGO-Fahrzeug, wenn folgende Bedingung erfüllt ist.

$$x_{S,I} > 0 \ \wedge \ x_{S,II} + d_{EGO} \geq 0 \tag{5.7}$$

Die Lücke befindet sich **neben** dem EGO-Fahrzeug, wenn folgende Bedingung erfüllt ist.

$$x_{S,I} > 0 \ \wedge \ x_{S,II} + d_{EGO} < 0 \tag{5.8}$$

Die Lücke befindet sich **hinter** dem EGO-Fahrzeug, wenn folgende Bedingung erfüllt ist.

$$x_{S,I} \leq 0 \ \wedge \ \mathrm{x}_{S,II} + d_{EGO} < 0 \tag{5.9}$$

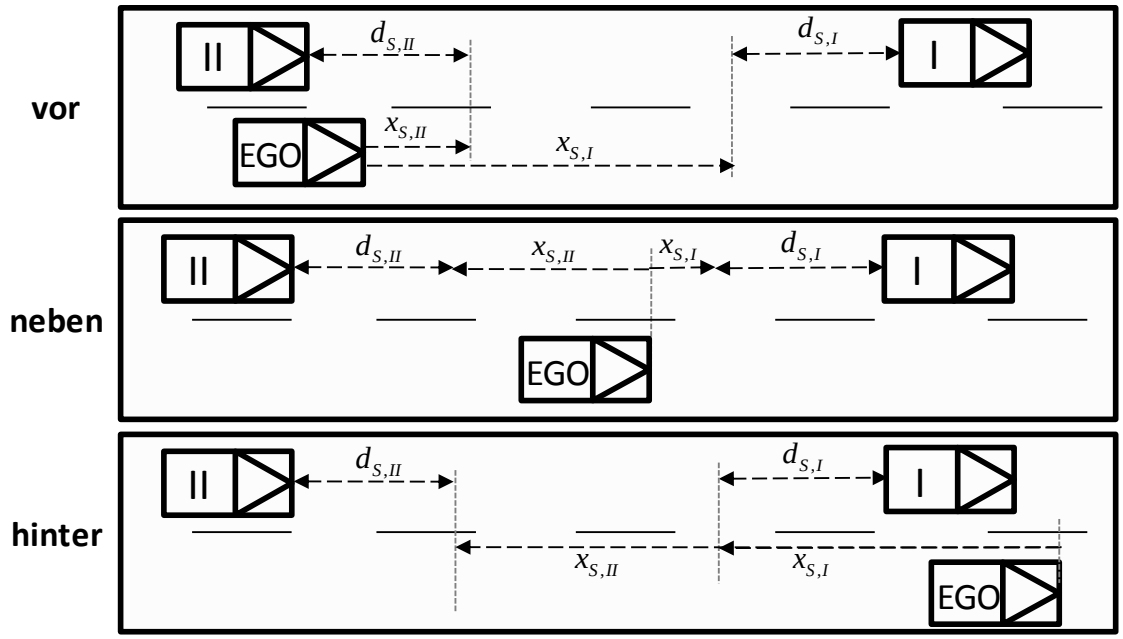


Abbildung 5-11: Lückenposition: vor, neben und hinter dem EGO-Fahrzeug

Die Anzahl der Situationen reduziert sich auf sieben. Diese sind in Abbildung 5-12 präsentiert.

In den Spalten wird die Lückenposition variiert, wobei die Ausbreitung der Lücke, wie erläutert, durch die Sicherheitsabstände der lückenbegrenzenden Fahrzeuge limitiert wird. Sind, wie in Abbildung 5-12 gezeigt, mehrere Lückenpositionen möglich, so ist die Position „neben“ aufgrund der einfachen Ausführbarkeit stets die favorisierte Position. Ist sie nicht möglich, so ist nur eine der weiteren beiden Lückenposition möglich.

Die Zeilen gliedern sich in Abhängigkeit der Relativgeschwindigkeit des Fahrzeugs mit der kürzeren longitudinalen Distanz zum EGO-Fahrzeug in die 3 Kategorien „auf EGO zu“, „parallel zu EGO“ und „von EGO weg“.

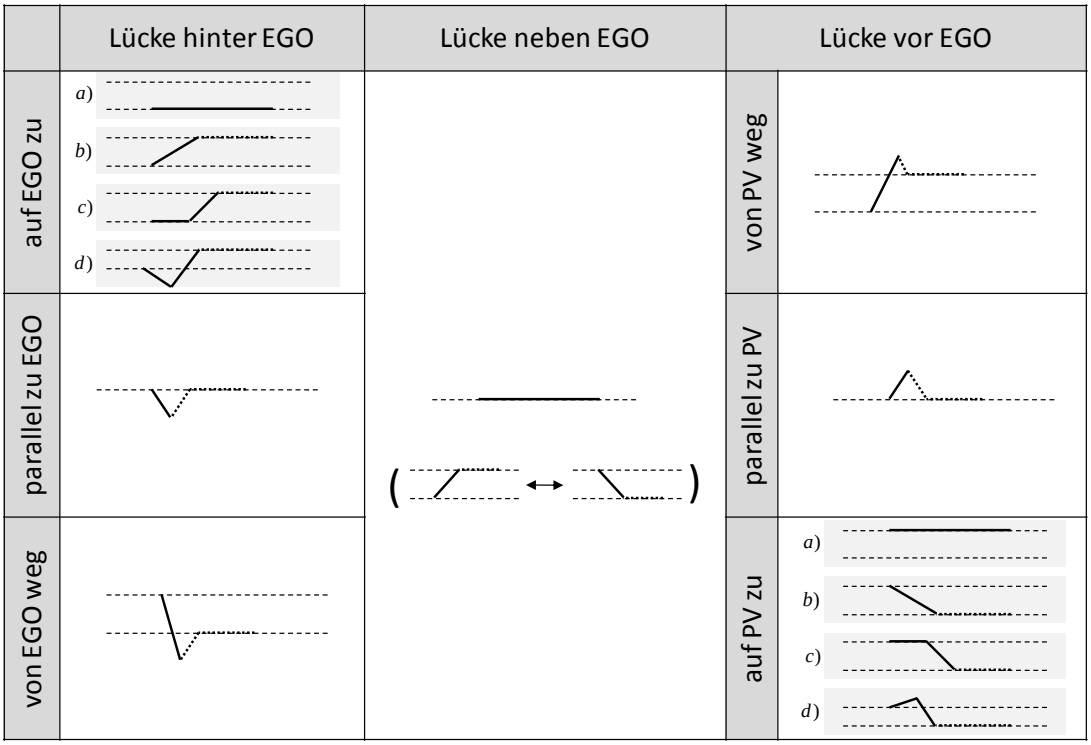


Abbildung 5-12: Situationsanalyse mit skizzierten Geschwindigkeitsverläufen über der Zeit

Die gestrichelten, waagerechten Linien kennzeichnen die Geschwindigkeit des lückenbegrenzenden Fahrzeugs mit der kürzeren Distanz, nachfolgend auch Referenzfahrzeug bezeichnet, und des EGO-Fahrzeugs. Das Referenzfahrzeug kann sowohl Fahrzeug I als auch Fahrzeug II sein. Der durchgezogene Abschnitt der einzelnen Geschwindigkeitsverläufe in Abbildung 5-12 repräsentiert das Vorsteuerprogramm. Die Fahrzeuggeschwindigkeit und der Geschwindigkeitsverlauf nach dem Wechsel sind nicht festgelegt und aus diesem Grund mit einer gestrichelten Linie dargestellt. Sind mehrere Geschwindigkeitsverläufe in einer Situation aufgeführt, so werden diese entsprechend ihrer hierarchischen Auflistung auf Durchführbarkeit geprüft. Dies wird nachfolgend exemplarisch an zwei Situationen erläutert.

Eine Lücke hinter dem EGO-Fahrzeug und ein sich annäherndes, lückenbegrenzendes Fahrzeug kennzeichnen die erste Situation. Der Fahrer hat insgesamt vier, mögliche, allgemeine Verhaltensweisen die Längsdynamik zu verändern. Diese sind in Abbildung 5-13 dargestellt. Die Manöver werden sequentiell auf ihre Durchführbarkeit geprüft. Die Nummerierung von a) bis d) im ersten Feld der Matrix entspricht der Priorität und gibt die Reihenfolge der Prüfung wieder. Die am einfachsten auszuführende Handlung a), ist keine Änderung der Geschwindigkeit vorzunehmen, auf die Lücke zu warten und mit konstanter Geschwindigkeit zu wechseln. Dabei handelt es sich um Vorsteuerprogramm 4. In diesem Fall wird dem nachfolgenden Fahrzeug eine Verzögerung zugemutet. Ist dieses Wechselmanöver nicht möglich, wird ein Manöver nach Vorsteuerprogramm 3, ein Wechsel mit Beschleunigung, geprüft. Manöver c) entspricht Vorsteuerprogramm 3 mit einem Beschleunigungsbeginn nach einer Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit. Ist

weder der Wechsel mit sofortigem Beschleunigen noch mit einem Beschleunigen nach einer Wartezeit möglich, bleibt die Möglichkeit, zunächst zu verzögern und im Anschluss zu beschleunigen. Allerdings ist dies ein mehrstufiges Beschleunigungsmanöver, das, wie in Kapitel 5.1 Fahrstreifenwechsel-Vorsteuerprogramme beschrieben, ausgeschlossen wurde und somit unberücksichtigt bleibt.

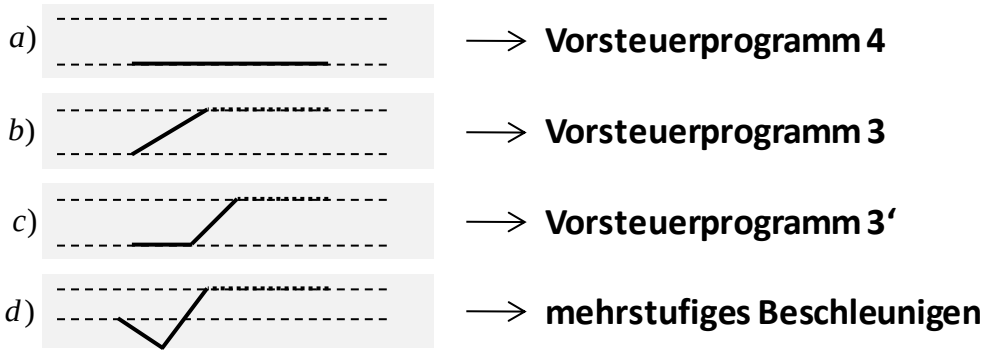


Abbildung 5-13: Skizzierter Geschwindigkeitsverlauf über der Zeit

Befindet sich eine Lücke neben dem EGO-Fahrzeug, wird Vorsteuerprogramm 4 ausgewählt und der Wechsel ist ohne Beschleunigen bzw. Verzögern möglich. In dieser Situation erfolgt keine Unterscheidung nach der Relativgeschwindigkeit zu den lückenbegrenzenden Fahrzeugen, da diese bereits bei der Berechnung der Sicherheitskriterien berücksichtigt wurden.

5.2.4 Fahrstreifenwechselprädiktion

Allen Vorsteuerprogrammen gemein ist die Berechnung der Zeitpunkte der Unterschreitung der Sicherheitsabstände, die zunächst erläutert wird. Im Anschluss ist die Prädiktion der Fahrstreifenwechseldurchführung von Vorsteuerprogramm 2 und 3 mit einer iterativen und mit einer analytischen Berechnungsmethode erläutert, da die analytische Berechnung ausschließlich für ausgewählte Vorsteuerprogramme eingesetzt wurde.

Allgemeine Prädiktion der Längsdynamik des Fahrstreifenwechsels

Allen Vorsteuerprogrammen gemein ist die Prädiktion der Längsdynamik eines Fahrstreifenwechsels. Während des Fahrstreifenwechsels ist die Einhaltung des Sicherheitsabstands zu allen beteiligten Fahrzeugen zu gewährleisten. Wie in Kapitel 5.2.2 erläutert, ist während der Dauer von 2,78 s der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug einzuhalten und während der Dauer von 1,68 s zum gleichzeitigen Befahren beider Fahrstreifen ist der Sicherheitsabstand zu allen drei beteiligten Fahrzeugen einzuhalten. Aus diesem Grund werden die Zeitpunkte des Unterschreitens des Sicherheitskriteriums für jedes Fahrzeug berechnet.

Für den Sicherheitsabstand des vorausfahrenden Fahrzeugs I, das sich nach getroffener Annahme mit konstanter Geschwindigkeit bewegt, ergibt sich mit dem Sicherheitskrite-

rium nach Gleichung 5.3 und der Annahme einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung des EGO-Fahrzeugs mit a_{EGO} die Gleichung:

$$d_{sicher,I} = \frac{v_{EGO,0}^2 + 2v_{EGO,0}a_{EGO}t + a_{EGO}^2 t^2}{2D_{B,EGO}} + v_{EGO,0}\tau_{R,EGO} + a_{EGO}\tau_{R,EGO}t - \frac{v_I^2}{2D_{B,I}} \quad 5.10$$

Die Gleichung für den Abstand zwischen EGO-Fahrzeug und Fahrzeug I lautet:

$$d_I = d_{I,0} + v_I t - v_{EGO,0}t - \frac{a_{EGO}}{2}t^2 \quad 5.11$$

Durch Gleichsetzen der Formeln ergibt sich die Zeit bis zum Unterschreiten des Sicherheitsabstands:

$$t_{sicher,I} = P \pm \sqrt{P^2 - Q} \quad 5.12$$

mit

$$P = \frac{D_{B,EGO}(v_I - v_{EGO,0})}{a_{EGO}(D_{B,EGO} + a_{EGO})} - \frac{v_{EGO,0} + D_{B,EGO}\tau_{R,EGO}}{(D_{B,EGO} + a_{EGO})} \quad 5.13$$

und

$$Q = \frac{2D_{B,EGO}(v_{EGO,0}\tau_{R,EGO} - d_{I,0}) + {v_{EGO,0}}^2}{a_{EGO}(D_{B,EGO} + a_{EGO})} - \frac{D_{B,EGO}{v_I}^2}{D_{B,I}a_{EGO}(D_{B,EGO} + a_{EGO})} \quad 5.14$$

Entsprechend Formel 5.14 lassen sich die Zeiten bis zum Unterschreiten des Sicherheitsabstandes für die Fahrzeuge II und III berechnen.

Die Bestimmung des jeweiligen frühesten Wechselbeginns und der maximalen Wechseldauer, d.h. die maximale Dauer der Belegung beider Fahrstreifen, wird situationsadaptiv für jedes Vorsteuerprogramm bestimmt.

Vorsteuerprogramm 2: Iterative Berechnung

Vorsteuerprogramm 2 beschreibt einen Wechsel mit Verzögerung. Der Berechnungsablauf ist in Abbildung 5-14 dargestellt. Im ersten Schritt der iterativen Berechnung wird die Beschleunigung a auf -0,1 m/s² festgelegt und die maximale Dauer der zweiten Phase $t_{Phase2,\max}$, die den Zeitraum der Belegung beider Fahrstreifen durch das EGO-Fahrzeug beschreibt, sowie der früheste Wechselzeitpunkt $t_{Phase1,\min}$ werden berechnet. Aus Kapitel 5.2.2 Sicherheitskriterium im zeitlichen Verlauf des Fahrstreifenwechsels sind die Schwellenwerte der ersten Phase T_{Phase1}, der zweiten Phase T_{Phase2} und der Dauer der beiden Phasen $T_{Duration}$ bekannt. Der Wechsel ist möglich, wenn die folgende Ungleichung erfüllt ist:

$$\left(t_{Phase2,\max} > T_{Phase2}\right) \wedge \left(t_{Phase1,\min} + t_{Phase2,\max} > T_{Duration}\right) \quad 5.15$$

Ist der Wechsel nicht möglich, wird die Verzögerung schrittweise um 0,1 m/s² reduziert bis der Wechsel möglich ist oder die minimale Verzögerungsfähigkeit von 3,5 m/s² in Anlehnung an die ISO 22179[125] für Full Speed Range-ACC erreicht ist. Als Ergebnis des Vorsteuerprogramms liegen eine Aussage über die Durchführbarkeit, sowie die erforderliche Beschleunigung und die Zeiten für den Wechsel vor.

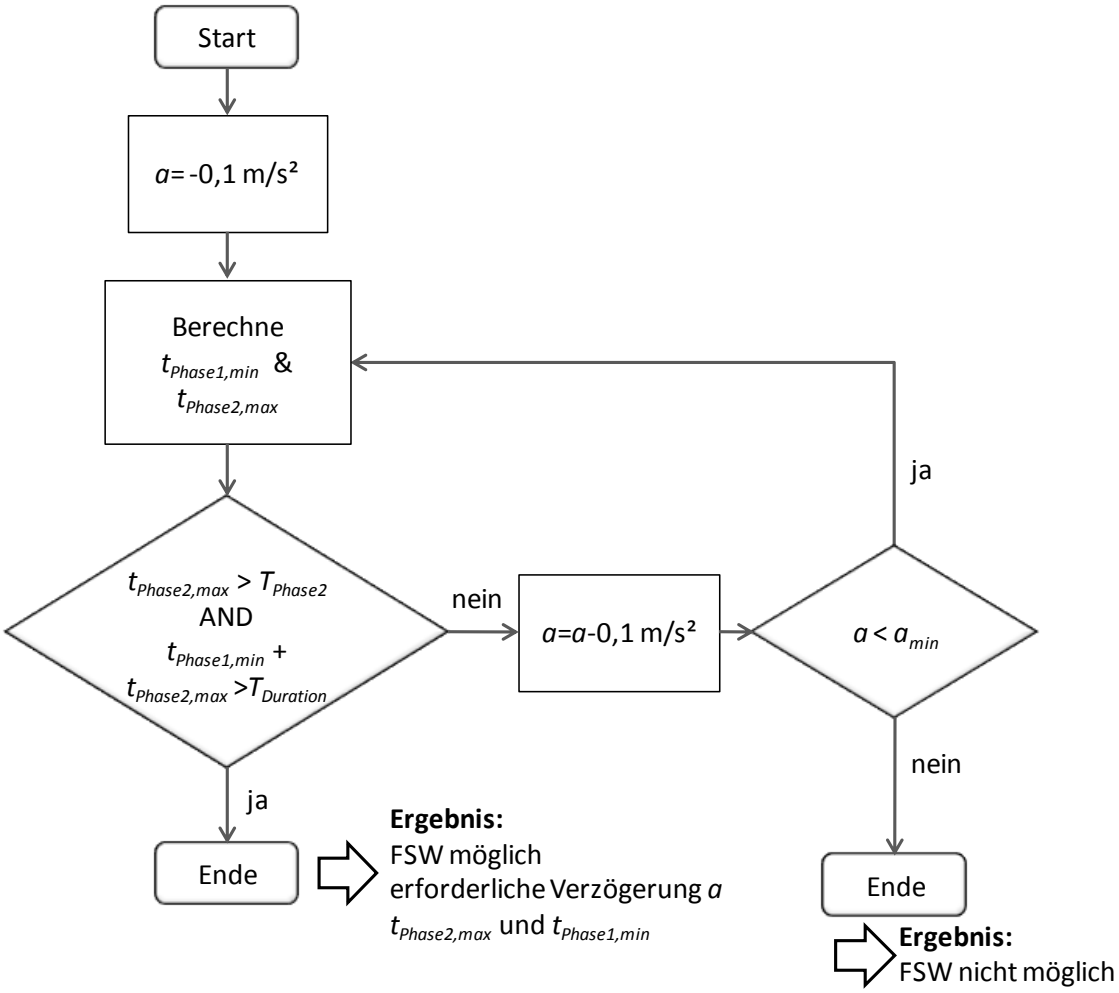


Abbildung 5-14: Ablauf von Vorsteuerprogramm 2

Vorsteuerprogramm 2‘ entspricht Vorsteuerprogramm 2 mit einer weiteren Schleife, die den initialen Abstand $d_{I,0}$ bzw. $d_{II,0}$ zwischen den Fahrzeugen unter Berücksichtigung der vorliegenden Relativgeschwindigkeit v_{rel} nach folgender Formel prädiziert und somit die Durchführbarkeit eines Fahrstreifenwechsels mit Verzögerung nach einer Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit prüft:

$$\begin{aligned} d_{I,i} &= d_{I,0} + i \cdot \Delta t \cdot v_{rel} \\ d_{II,i} &= d_{II,0} + i \cdot \Delta t \cdot v_{rel} \end{aligned} \quad 5.16$$

[125] ISO 22179: full speed range adaptive cruise control

Da die Zuverlässigkeit der Prädiktion über der Zeit abnimmt, ist die maximale Prädiktionsdauer T_{Pred} auf 10 s begrenzt. Der aus Abbildung 5-14 bekannte Ablauf wird damit erweitert und ist in Abbildung 5-15 dargestellt.

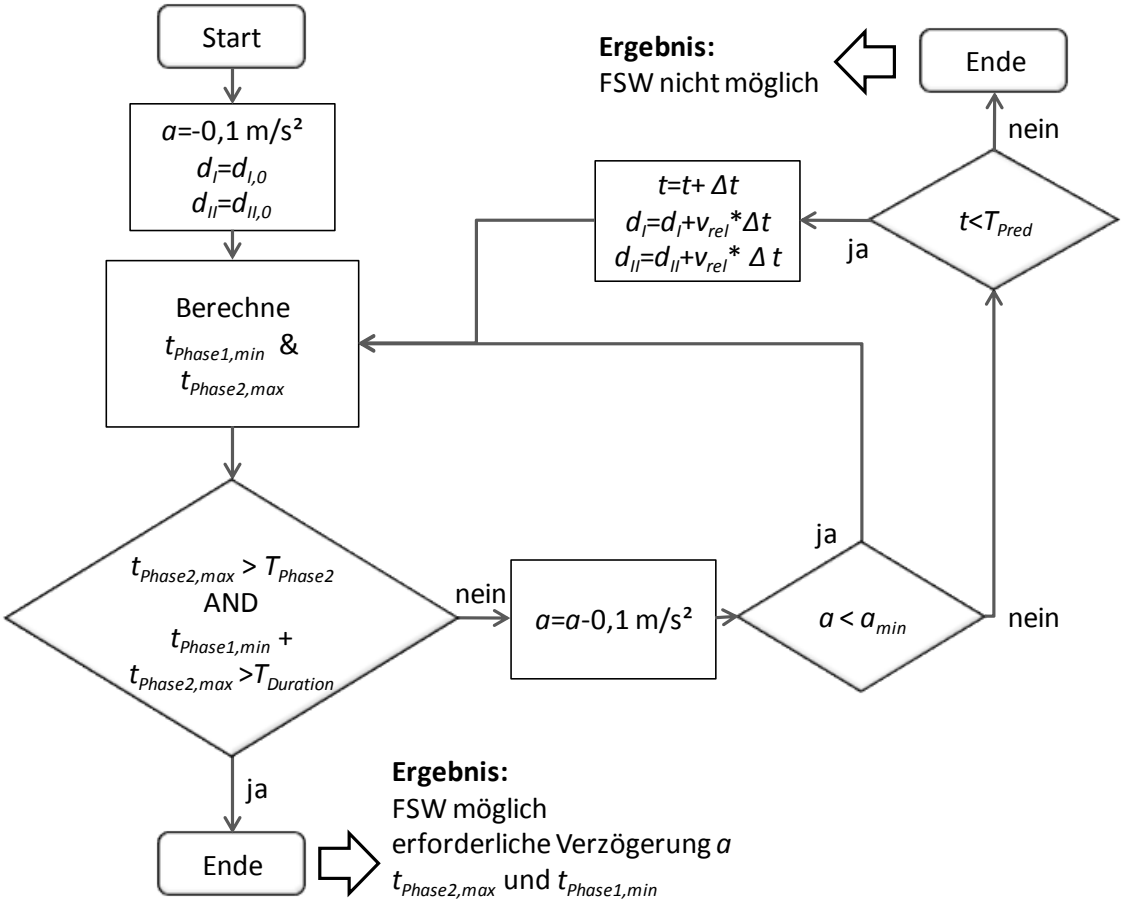


Abbildung 5-15: Ablauf von Vorsteuerprogramm 2‘

Vorsteuerprogramm 3: Analytische Berechnung

Neben der iterativen Prädiktion des Fahrstreifenwechselmanövers existiert eine alternative, analytische Berechnungsmöglichkeit, die eine geringere Rechenkapazität benötigt. Diese wird nachfolgend erläutert.

Bewegen sich die lückenbegrenzenden Fahrzeuge I und II und das auf dem Startfahrstreifen vorausfahrende Fahrzeuge III gleichförmig und das EGO-Fahrzeug mit gleichmäßig beschleunigter Bewegung, so lauten die Bewegungsgleichungen der drei Fahrzeug I, II und III im fahrzeugfesten Koordinatensystem des EGO-Fahrzeugs mit den initialen Abständen $d_{I,0}, d_{II,0}, d_{III,0}$:

$$
\begin{aligned}
x_I(t) &= d_{I,0} + v_I t - v_{EGO} t - \frac{1}{2} a_{EGO} t^2 \\
x_{II}(t) &= d_{II,0} + v_{II} t - v_{EGO} t - \frac{1}{2} a_{EGO} t^2 \\
x_{III}(t) &= d_{III,0} + v_{III} t - v_{EGO} t - \frac{1}{2} a_{EGO} t^2
\end{aligned}
\tag{5.17}
$$

Die Sicherheitsabstände nach Formel 5.3 in Abhängigkeit der Zeit lauten:

$$
\begin{aligned}
d_{S,I} &= \frac{\left(v_{EGO} + a_{EGO} t\right)^2}{2D_{B,EGO}} + \left(v_{EGO} + a_{EGO} t\right)\tau_{R,EGO} - \frac{v_I^2}{2D_{B,I}} \\
d_{S,II} &= \frac{v_{II}}{2D_{B,II}} + v_{II}\tau_{R,II} - \frac{\left(v_{EGO} + a_{EGO} t\right)^2}{2D_{B,EGO}} \\
d_{S,III} &= \frac{\left(v_{EGO} + a_{EGO} t\right)^2}{2D_{B,EGO}} + \left(v_{EGO} + a_{EGO} t\right)\tau_{R,EGO} - \frac{v_{III}^2}{2D_{B,III}}
\end{aligned}
\tag{5.18}
$$

Die Bewegungsgleichungen der durch die Sicherheitsabstände und die Bewegungsgleichungen definierten Lückengrenzen entsprechend Abbildung 5-11 ergeben sich mit den Formeln 5.17 und 5.18 zu:

$$
\begin{aligned}
x_{S,I}(t) &= x_I(t) - d_{S,I}(t) \\
&= d_{I,0} + \left(v_I - v_{EGO}\right)t - \frac{1}{2} a_{EGO} t^2 - \frac{\left(v_{EGO} + a_{EGO} t\right)^2}{2D_{B,EGO}} - \left(v_{EGO} + a_{EGO} t\right)\tau_{R,EGO} + \frac{v_I^2}{2D_{B,I}}
\end{aligned}
\tag{5.19}
$$

$$
\begin{aligned}
x_{S,II}(t) &= x_{II}(t) + d_{S,II}(t) \\
&= d_{II,0} + \left(v_{II} - v_{EGO}\right)t - \frac{1}{2} a_{EGO} t^2 + \frac{v_{II}^2}{2D_{B,II}} + v_{II}\tau_{R,II} - \frac{\left(v_{EGO} + a_{EGO} t\right)^2}{2D_{B,EGO}}
\end{aligned}
\tag{5.20}
$$

$$
\begin{aligned}
x_{S,III}(t) &= x_{III}(t) - d_{S,III}(t) \\
&= d_{III,0} + \left(v_{III} - v_{EGO}\right)t - \frac{1}{2} a_{EGO} t^2 - \frac{\left(v_{EGO} + a_{EGO} t\right)^2}{2D_{B,EGO}} - \left(v_{EGO} + a_{EGO} t\right)\tau_{R,EGO} + \frac{v_{III}^2}{2D_{B,III}}
\end{aligned}
\tag{5.21}
$$

Nachfolgende Betrachtungen gelten für eine zurückliegende, sich annähernde Lücke. Dieses Szenario entspricht dem Vorsteuerprogramm 3.

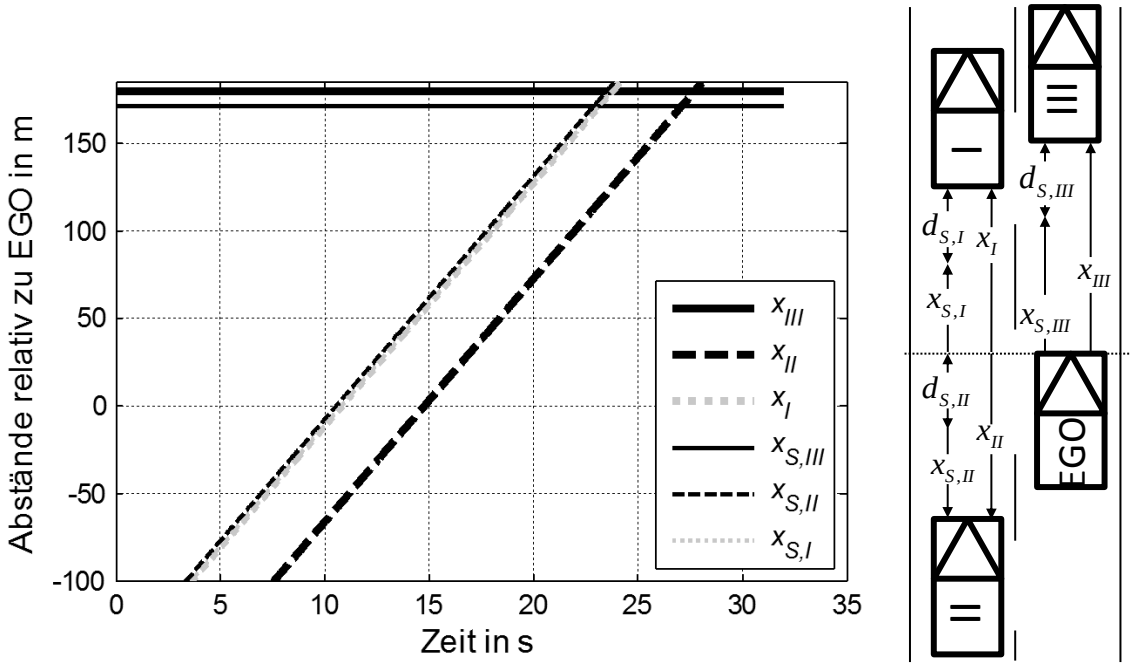


Abbildung 5-16: Distanzen im fahrzeugfesten EGO-Koordinatensystem bei a_{EGO}=0 m/s²

Abbildung 5-16 zeigt die Distanzen relativ zum fahrzeugfesten Koordinatensystem des EGO-Fahrzeugs für die drei Fahrzeuge im zeitlichen Verlauf auf der linken Seite und die Nomenklatur auf der rechten Seite. Die Anfangsposition der Fahrzeuge I, II und III sind $d_{I,0} = -150$ m, $d_{II,0} = -205$ m, $d_{III,0} = 180$ m und sie bewegen sich mit den Geschwindigkeiten von $v_I = v_{II} = 130$ km/h, $v_{III} = 80$ km/h. Das EGO-Fahrzeug bewegt sich mit der Anfangsgeschwindigkeit von $v_{EGO} = 80$ km/h. Die dicken Linien zeigen die Fahrzeugdistanzen nach Gleichung 5.17 und die dünnen Linien zeigen den Verlauf der Sicherheitsdistanzen nach den Gleichungen 5.19 bis 5.21. Im dargestellten Szenario bewegt sich das EGO-Fahrzeug mit konstanter Geschwindigkeit. Die Fahrzeuge I und II nähern sich dem EGO-Fahrzeug von hinten. Der Sicherheitsabstand von Fahrzeug I $x_{S,I}$ und der Abstand von Fahrzeug I x_I sind identisch. Der Sicherheitsabstand von Fahrzeug II $x_{S,II}$ ist stets größer als der Abstand von Fahrzeug I x_I. Diese Situation ist in Abbildung 5-17 aus der Zentralperspektive dargestellt und veranschaulicht, dass ein Wechsel in die Lücke nicht möglich ist, da der Sicherheitsabstand des hinteren, lückenbegrenzenden Fahrzeugs größer als die Lücke ist.

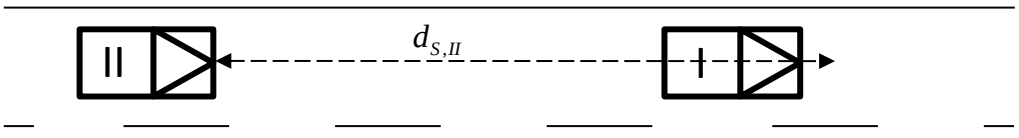


Abbildung 5-17: Der Sicherheitsabstand von Fahrzeug 2 ist größer als die Lückenlänge

Durch ein Beschleunigen des EGO-Fahrzeugs reduziert sich die Relativgeschwindigkeit zwischen Fahrzeug II und dem EGO-Fahrzeug und damit wird der Sicherheitsabstand $d_{S,II}$ kleiner. Diese Situation ist für eine Beschleunigung von $a_{EGO} = 0{,}45$ m/s², basierend auf den bereits erwähnten Ausgangsdaten in Abbildung 5-18 dargestellt. Des Wei-

teren sind die Zeitpunkte des Passierens der Sicherheitsdistanzen in der Abbildung mit t_1 und t_2 bezeichnet. Die Zeitdauer $t_2 - t_1$ steht dem Fahrer zur Wechseldurchführung als T_{Phase1} zur Verfügung und muss noch eine Mindestdauer von 1,1 s aufweisen. Des Weiteren muss der Fahrer von seinem Fahrstreifenwechsel bis auf den Zielfahrstreifen wechseln $\left(T_{Phase1} + T_{Phase2}\right)$, bevor die Zeit t_2 überschritten wird.

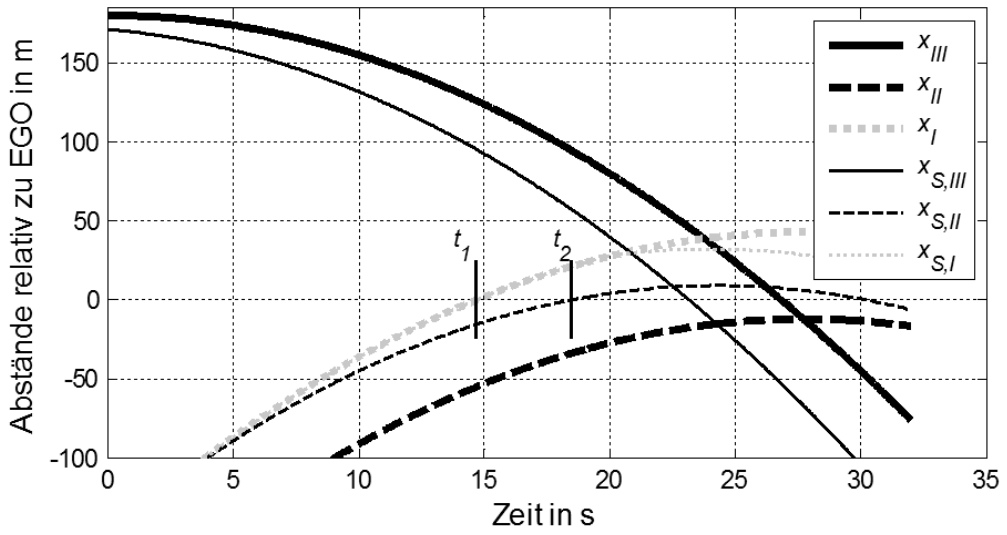


Abbildung 5-18: Distanzen im fahrzeugfesten EGO-Koordinatensystem bei a_{EGO}=0,45 m/s²

Aus diesen Bedingungen und den Bewegungsgleichungen lässt sich ein eindeutig lösbares Gleichungssystem aufstellen:

$$x_{S,I}\left(t_1, a_{EGO}\right) = 0 \tag{5.22}$$

$$x_{S,II}\left(t_2, a_{EGO}\right) = 0 \tag{5.23}$$

$$\left(t_2 - t_1\right) > T_{Phase2} \tag{5.24}$$

$$t_2 > T_{Phase1} + T_{Phase2} \tag{5.25}$$

Aus den Gleichungen 5.22, 5.24, 5.25 und 5.19 lässt sich eine Beschleunigung $a_{EGO,1}$ und aus den Gleichungen 5.23, 5.25 und 5.20 lässt sich eine Beschleunigung $a_{EGO,2}$ berechnen. Der maximale Betrag der beiden Beschleunigungen ergibt den minimalen Betrag der erforderlichen Beschleunigung unter der Voraussetzung, dass das EGO-Fahrzeug während dem Fahrstreifenwechsel nicht den Sicherheitsabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug III unterschreitet.

$$a_{EGO} = MAX\left(a_{EGO,1}, a_{EGO,2}\right) \tag{5.26}$$

$$x_{S,III}(t_2, a_{EGO}) > 0 \tag{5.27}$$

Ist diese Bedingung erfüllt, ist der Fahrstreifenwechsel mit der berechneten Beschleunigung möglich. Andernfalls ist der Wechsel nicht möglich.

5.3 Fahrerabsichtsdetektion

Die bedarfsgerechte Unterstützung erfordert eine Detektion des Fahrstreifenwechselwunsches. Nachfolgend sind die Motivation und die konzeptionelle Umsetzung einer Methode zur bedarfsgerechten Fahrerabsichtsdetektion beschrieben. Eine Validierung des Verfahrens in Probandenversuchen ist nicht angestrebt, da auch eine permanente Assistenz oder eine manuelle Systemaktivierung in Abhängigkeit der HMI-Gestaltung denkbar sind. Die Vor- und Nachteile werden nachfolgend diskutiert.

5.3.1 Anforderungen und Zielsetzung

LCDAS bieten eine **bedarfsgerechte** Warnung und nutzen den Fahrtrichtungsanzeiger zur Fahrstreifenwechseldetektion. Dieser wird allerdings erst kurz vor der Wechseldurchführung betätigt[126] oder er wird gar nicht verwendet[127,128]. Andere Systeme, die z.B. von Schmitt[129] und Mammar[118] beschrieben werden, bestimmen die Zeit bis zum Überfahren der Fahrbahnmarkierung (engl. time to line crossing - TLC) durch Messung der Fahrzeugposition innerhalb des Fahrstreifens und Prädiktion der Fahrzeugtrajektorie. Auch bei Verwendung dieses Verfahrens ist eine langfristige Unterstützung mit relevanter Geschwindigkeitsänderung zur Synchronisierung mit dem Zielfahrstreifen nicht möglich. Wird beispielsweise eine Lücke in der Entfernung von 150 m detektiert und die Fahrzeuge auf dem Zielfahrstreifen fahren 50 km/h schneller, wird die Lückenposition das EGO-Fahrzeug in ca. 11 s passieren. Eine kurzfristige Fahrerempfehlung bewirkt lediglich einen geringen Abbau der Differenzgeschwindigkeit. Wenn der Fahrer der Systemempfehlung folgend allerdings bereits bei einer Lückendistanz von $d = 150\,\text{m}$ mit 0,5 m/s² leicht beschleunigt, wird die Differenzgeschwindigkeit nach Gleichung 5.28 um 44,1 km/h reduziert und die Lücke wird das Fahrzeug nach Gleichung 5.29 erst nach 105,4 s passieren.

$$v_{diff} = \sqrt{2da} \approx 12,25\ \text{m/s} = 44,1\ \text{km/h} \tag{5.28}$$

$$t = \frac{2v_{diff}}{a} + \sqrt{\left(\frac{2v_{diff}}{a}\right)^2 - \frac{2d}{a}} = 105,4\ \text{s} \tag{5.29}$$

Aus diesem Grund sollte der Detektionszeitpunkt der Fahrerabsicht deutlich vor den Maßnahmen des Fahrers zur Einleitung bzw. zur Vorbereitung des Wechsels liegen. Die

[126] Mammar et al.: TLC Algorithms, 2006

[127] Lee et al.: Examination of Naturalistic Lane-Changes, 2004

[128] LeBlanc et al.: Road Departure Warning 1, 2006

[129] Schmitt et al.: Odometrie und Manövererkennung, 2009

Intentionserkennung kann auch als Wechselempfehlung durch den Fahrer interpretiert werden. Dementsprechend liegt der ideale Zeitpunkt der Fahrstreifenwechselwunscherkennung vor der konkreten Ausführungsplanung, so dass der Fahrer die Wechselempfehlung nachvollziehen kann und als sinnvoll zur Erreichung seiner persönlichen Ziele bewertet und ihr uneingeschränkt zustimmt. Durch das Verständnis des Verfahrens als empfehlendes System wird eine **manuelle** Wunscheingabe durch den Fahrer ausgeschlossen, da die Wunschbildung seitens des Fahrers vollständig abgeschlossen sein müsste.

Eine **permanente** Unterstützung des Fahrers kann vom Fahrer als bevormundend und störend wahrgenommen werden und erfordert ein sehr verzeihliches[130] HMI.

Um eine effektive Unterstützung durch den manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenten zu gewährleisten, ist eine frühzeitige Fahrerintentionserkennung mit hoher Prädiktionsgenauigkeit in der Vorbereitungsphase des Fahrstreifenwechsels basierend auf dem Fahrzeugumfeld bei möglichst geringer Fehlalarmrate erforderlich. So entsteht ein Warndilemma[131,132]. Dabei können False Negatives durch den Einsatz kurzfristiger Detektionsmethoden, z.B. durch Verfahren basierend auf TLC oder Fahrtrichtungsanzeiger, bei reduzierter Fahrerakzeptanz teilweise kompensiert werden. False Positives führen zur Störung des Fahrers und können die Fahrerakzeptanz ebenfalls reduzieren.

Henning[133] gibt einen umfassenden Überblick über den Stand der Technik zu Absichtsdetektionsmethoden. Allerdings ist weder von Henning noch aus eigener Recherche ein Verfahren zur Fahrerabsichtsdetektion für ein manöverbasiertes Fahrstreifenwechselassistenzsystem bekannt, das auf Umfeldsensordaten basiert und in einem Prototypfahrzeug integriert wurde.

5.3.2 Modulstruktur

Das realisierte Konzept basiert auf der Auswertung von messbaren Parametern hinsichtlich des Erfüllungsgrads der einzelnen Fahrerwünsche. Nach Schroven[134] werden die Parameter, wie in Abbildung 5-19 dargestellt, in Motivatoren, Inhibitoren und Indikatoren unterschieden. Der Wunsch des Fahrers einen Fahrstreifenwechsel durchzuführen wird von den Motivatoren und Inhibitoren erhöht oder reduziert. Sie beschreiben das Umfeld des Fahrers, während die Indikatoren das Fahrerverhalten, das eine Reaktion auf das Umfeld darstellt, abbilden.

---

[130] Hoffmann et al.: Fahrerwarnelemente, 2012, S. 348 ff.

[131] Meitinger: Aktive Sicherheitssysteme für Kreuzungen, 2008, S. 39 - 42

[132] Hoffmann et al.: Fahrerwarnelemente, 2012, S. 349 ff.

[133] Henning: Preparation for Lane Changing, 2010

[134] Schroven et al.: Fahrerintentionserkennung für FAS, 2008

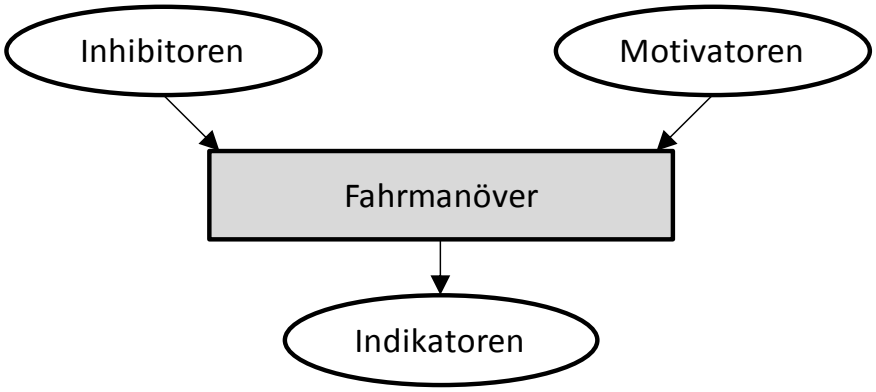


Abbildung 5-19: 3-Ebenen-Modell der Fahrerintentionserkennung[135]

Die Parameteridentifizierung erfolgt entsprechend ihrer räumlichen Struktur nach Abbildung 5-20 links. Die höchste Abstraktionsebene ist die Route, die u.a. die Dauer und Distanz sowie die Verkehrsdichte beinhaltet. Die zweite Abstraktionsebene, die als Trasse bezeichnet wird, beschreibt die Geometrie der Strecke und berücksichtigt z.B. die Krümmung, die Breite und die Neigung der Straße. Die Fahrbahnebene erfasst die Anzahl der Fahrstreifen und Verkehrszeichen und auf der untersten Ebene sind die Fahrzeuge und Hindernisse auf der Strecke berücksichtigt. Die Identifizierung von möglichen Parameter und deren Auswahl sind ausführlich in Habenicht et al.[136] beschrieben.

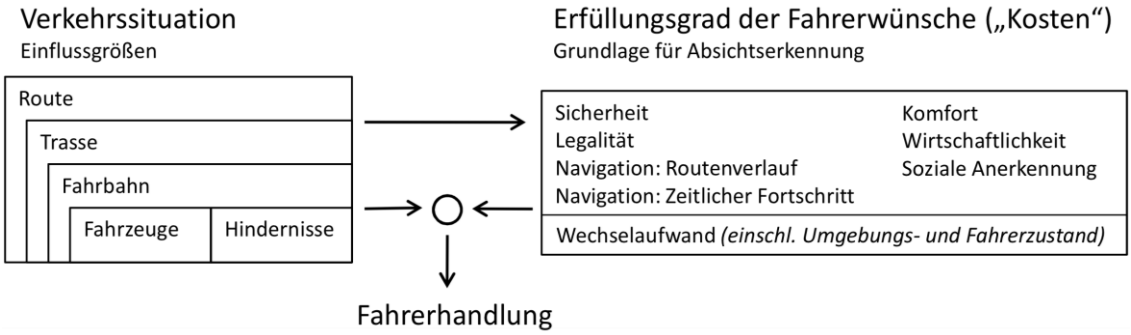


Abbildung 5-20: Konzept des Fahrerintentionsdetektionsmoduls

Wie in Abbildung 5-20 dargestellt repräsentieren die Parameter Fahrerwünsche, die sich als Kostenstellen darstellen lassen. Entsprechende Ansätze der Nützlichkeitsbewertung beschreiben u.a. Hochstädter[137] und Choudhury[138]. In Abhängigkeit ihres Erfüllungsgrades und einem definierten Wechselaufwand führen die Einflussgrößen zu einer Fahrerhandlung. Die Kostenstelle „Wunsch nach sozialer Anerkennung“ beschreibt die Kooperationsbereitschaft des Fahrers.

[135] Schroven et al.: Fahrerintentionserkennung für FAS, 2008, S. 5

[136] Habenicht et al.: Maneuver-Based Lane Change Assistance, 2011

[137] Hochstädter et al.: Ein universelles Fahrermodell, 2000

[138] Choudhury: Modeling Driving Decisions, 2007

Aus der Literatur sind verschiedene Verknüpfungsmethoden der einzelnen Parameter bekannt. Eine binäre Verknüpfung basierend auf der Überschreitung von Schwellwerten beschreibt Benmimoun[139]. Ein Hidden Markov Modell wird von Oliver[140] zur Fahrerabsichtsdetektion genutzt und Dagli[141] kombiniert Parameter mit einem probabilistischen Netzwerk. Blaschke[142] erzielte mit Fuzzy Logik gute Resultate. Da ein Modell basierend auf Fuzzy Logik zusätzlich sehr flexibel ist und die Regeln einfach zu verstehen und anzupassen sind, wurde diese Methode ausgewählt.

Das verifizierte Modell wurde in Fahrversuchen erprobt. Zur vollständigen Validierung ist die tatsächliche Fahrerabsicht notwendig. Die Bildung der Fahrerabsicht und das damit verbundene Situationsbewusstsein sind allerdings kontinuierliche Prozesse, die im Unterbewusstsein ablaufen[143] und nicht eindeutig zeitlich definierbar sind. Lediglich die Handlungen des Fahrers als Reaktion sind messbar. Aus der Literatur sind verschiedene Verfahren zur näherungsweisen Erfassung der Fahrerabsicht bekannt: Durch Tastendruck markiert ein trainierter Beobachter im Fahrzeug den Zeitpunkt einer vorliegenden Fahrstreifenwechselintention des Fahrers.[144,145] Die Videobilder der Versuchsfahrten werden durch Experten bewertet und sie identifizieren den Zeitpunkt der Intentionsbildung. Alternativ werden die Videobilder vom Probanden im Anschluss an die Versuche analysiert.[136] Durch „Lautes Denken“ beschreibt der Fahrer während der Versuchsfahrt unablässig seine Gedanken und teilt auf diese Weise seine Absicht mit.[146,147] Die vom System detektierte Absicht wird dem Fahrer optisch oder akustisch dargestellt. Der Fahrer bewertet während oder im Anschluss an die Fahrt die Übereinstimmung.[148]

Somit sind sowohl die Anforderungen, die Umsetzung und die Validierung einer Fahrerabsichtsdetektion für einen manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenten skizziert. Eine Realisierung kann in Abhängigkeit des gewünschten Unterstützungsgrades erfolgen.

---

[139] Benmimoun: Entwicklung von situationsadaptiven Fahrerassistenzsystemen, 2004

[140] Oliver et al.: Driver Behavior Recognition, 2000

[141] Dagli et al.: Action Recognition and Prediction, 2002

[142] Blaschke et al.: Überholmanöver-Prädiktion über CAN, 2008

[143] Buld et al.: Wirkungen von Assistenz und Automation auf den Fahrer, 2002, S. 118

[144] Blaschke et al.: Überholmanöver-Prädiktion über CAN-Bus Daten, 2008

[145] Henning: Preparation for lane changing, 2010

[146] Oliver et al.: Driver Behavior Recognition, 2000, S. 10

[147] Wu et al.: Fuzzy sets for a motorway simulation model, 1998, S. 67

[148] Mann: Entwicklung eines Querführungsassistenten, 2008, S. 175

5.4 HMI: Display

Das Ziel des HMIs ist die Übermittlung der Manöverempfehlung an den Fahrer. Die bei der Fahrzeugführung am häufigsten eingesetzten Sinneskanäle stützen sich auf die visuelle, haptische und auditive Wahrnehmung.[149,150]

Ein akustisches Element kann vom Fahrer als störend oder bloßstellend wahrgenommen werden. Ein haptisches Element ist nicht geeignet, die Komplexität der Manöverempfehlung abzubilden. Aus diesem Grund wurde ein optisches Element ausgewählt. Der Mensch nimmt mit dem visuellen Sinneskanal 80 - 90 % der Informationen beim Autofahren auf.[151]

Als Hardware wird ein 5,4 Zoll LCD mit einer Auflösung von 800 x 480 Pixeln verwendet, das auf dem Armaturenbrett ca. 15 cm rechts der Lenkradachse befestigt ist. Der Nachteil der großen horizontalen Abweichung zur Sehachse wurde zu Gunsten der geringen vertikalen Abweichung zur Sehachse und der geringstmöglichen Verdeckung des Sichtfeldes zur Fahrbahn bei Nichtverdeckung der bestehenden Anzeigen und Bedienelemente in Kauf genommen.

Neben den Gestaltungsgrundlagen aus Richtlinien[152] und Normen[153], die sowohl die Farbgestaltung, die Symbolgröße als auch charakteristische Eigenschaften für eine optische Anzeige empfehlen, sind zur effektiven und effizienten Unterstützung nach ISO 13407[154] insbesondere die Nutzeranforderungen[155] im Kontext mit dem Fahrstreifenwechselmanöver berücksichtigt. Dies sind die Wahrnehmungszeit, die als Zeit von der Reizdarbietung bis zur Reizerkennung durch den Fahrer definiert ist, die Unterscheidbarkeit zwischen den dargebotenen Informationselementen, die intuitive Assoziation des dargebotenen Reizes mit einem Handlungsmuster und die grundsätzliche Akzeptanz, die beispielsweise eine geringe Störung und Bevormundung des Fahrers umfasst.

---

[149] Abendroth et al.: Leistungsfähigkeit des Menschen, 2009, S. 5

[150] Hoffmann et al.: Fahrerwarnelemente, 2012, S. 344

[151] Abendroth et al.: Leistungsfähigkeit des Menschen, 2009, S. 6

[152] Eine Überblick über einschlägige Richtlinien geben König: Nutzergerechte Entwicklung der Mensch-Maschine- Interaktion, 2012, S. 33 ff. und Kirchner et al.: Ergonomie für Konstrukteure, 1990

[153] International Organization for Standardization: ISO 15008, 2003

[154] Deutsches Institut für Normung: DIN EN ISO 13407: Benutzer-orientierte Gestaltung interaktiver Systeme, 1999

[155] Eine Anwendung des nutzerorientierten Gestaltungsprozess wird beispielsweise von Bruder et al.: Nutzen von Fahrversuchen für die Gestaltung, 2007 beschrieben.

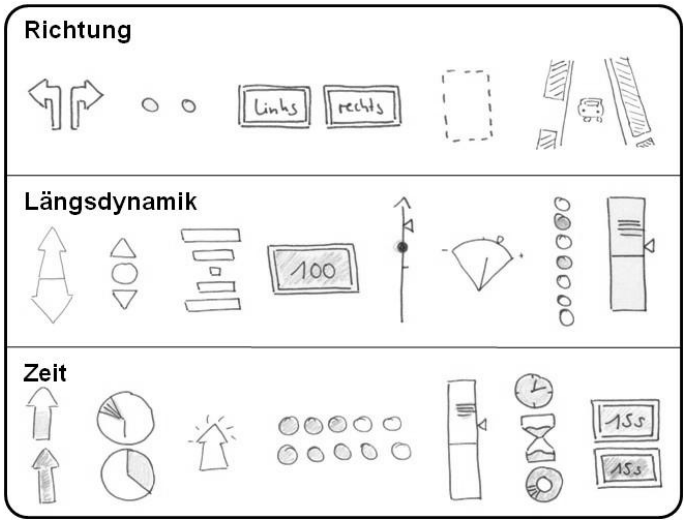


Abbildung 5-21: Beispielhafte Gestaltungslösungen nach Lange[156]

Für die drei wesentlichen Informationen der Manöverempfehlung Richtung, Längsdynamik und Zeit wurden der in Abbildung 5-21 ausschnittsweise dargestellte Lösungsraum ermittelt. Experten bewerteten und optimierten Stellvertreterlösungen aus den in einem Ordnungsschema kombinierten Einzellösungen im Labor anhand einer Simulation mit der Simulationssoftware CarMaker der Firma IPG und im Versuchsfahrzeug. Abbildung 5-22 zeigt die Labordarstellung zur Expertenbewertung mit einer Vogelperspektive auf das Szenario und einem Visualisierungskonzept der Manöverempfehlung, das nachfolgend beschrieben wird.

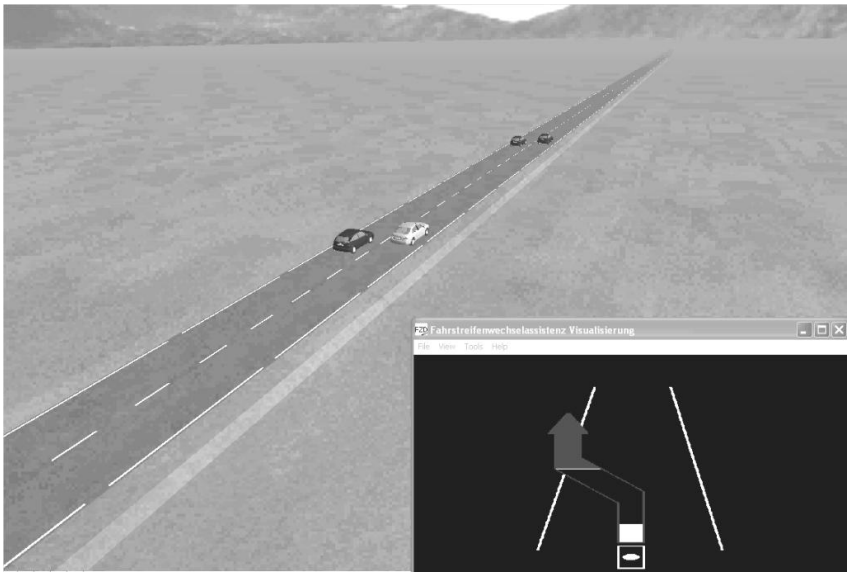


Abbildung 5-22: HMI-Bewertung im Labor

[156] Lange, Lena: Realisierung einer Mensch-Maschine Schnittstelle, 2010

Nachfolgend sind die vier Visualisierungskonzepte dargestellt. Konzept vier wurde schließlich basierend auf den Expertenmeinungen zur Versuchsdurchführung ausgewählt.

Visualisierungskonzept 1

Das erste Visualisierungskonzept ist in Abbildung 5-23 dargestellt. In der linken Darstellung zeigt eine rote Umrandung des Pfeils, dass der Wechsel in der aktuellen Situation nicht möglich ist. Die weiße, horizontale Linie innerhalb des Pfeils repräsentiert den frühestmöglichen Wechselzeitpunkt. Der Pfeil füllt sich Weiß bis zu dieser Schwelle mit abnehmender Zeit zum Fahrstreifenwechsel. Auf eine rote Füllung wurde zugunsten einer geringeren Bevormundung verzichtet. Sobald die Schwelle überschritten wird, ist der Wechsel möglich. Diese Situation ist in der rechten Hälfte der Abbildung dargestellt. Die Pfeilspitze färbt sich grün und die symbolisierte Fahrbahnmarkeirung ist gestrichelt und nicht mehr durchgezogen. Die Zeit bis zum letztmöglichen Wechselzeitpunkt wird erneut durch die horizontale Linie innerhalb des Pfeils dargestellt. Die grüne Füllung zeigt die Dauer bis zum letztmöglichen Wechselzeitpunkt. Die Fahrbahnmarkierung wird in Abhängigkeit der Wechselmöglichkeit liniert oder durchgezogen dargestellt. Das quadratische Kästchen am unteren Ende des Pfeils zeigt die geforderte Längsdynamik. Im dargestellten Beispiel wird links eine leichte Beschleunigungs- und rechts eine starke Beschleunigungsänderung gefordert.

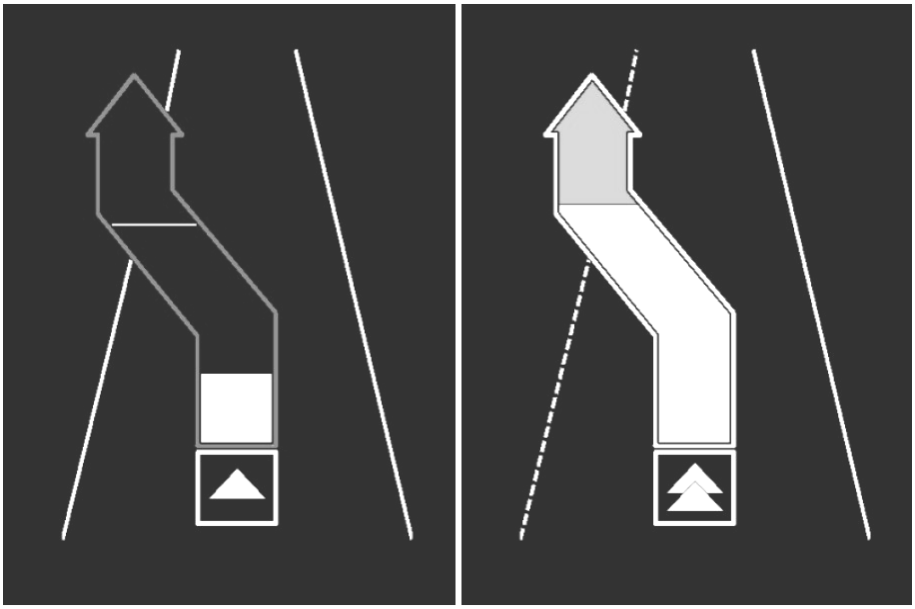


Abbildung 5-23: Visualisierungskonzept 1

Visualisierungskonzept 2

Das zweite Konzept ist in Abbildung 5-24 dargestellt. Der weiße, vertikale Pfeil zeigt stufenlos die geforderte Längsdynamik in Relation zur maximalen Längsdynamik, die grau hinterlegt ist. Die Fahrbahnmarkierung kann erneut gestrichelt oder durchgezogen dargestellt werden. Der horizontale Pfeil zeigt die Wechselmöglichkeit und beinhaltet die Zeitinformation. In der linken Hälfte der Abbildung ist der Pfeil rot. Der Wechsel ist

nicht möglich. Das Rechteck innerhalb des Balkens wird durch den frühestmöglichen und den spätesten, möglichen Wechselzeitpunkt definiert und ist grün gefärbt. Wird die Zeit bis zum Fahrstreifenwechsel kleiner, nähert sich das grüne Rechteck dem eingefärbten Pfeil. Wenn der Wechsel möglich ist, wird der Pfeil grün eingefärbt. Diese Situation ist in der rechten Bildhälfte dargestellt.

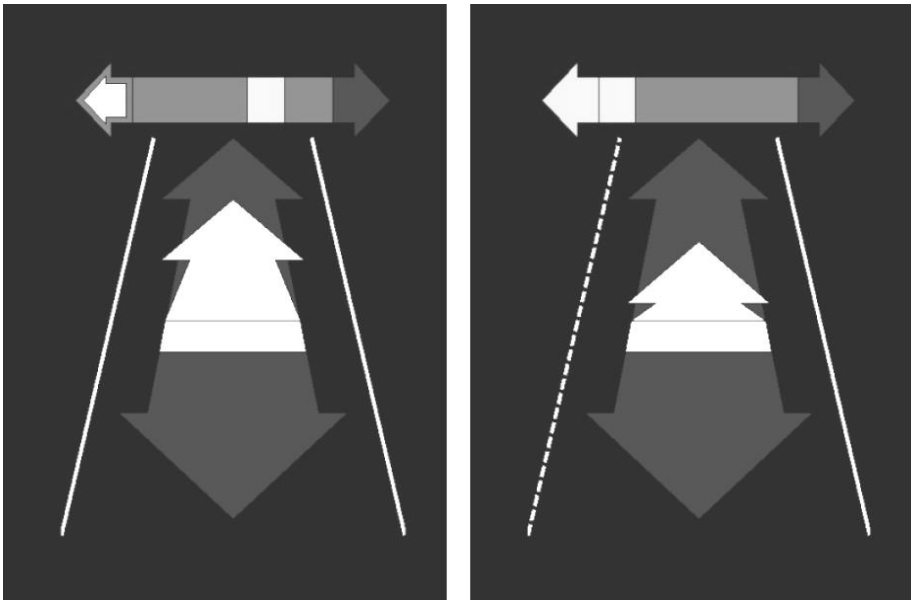


Abbildung 5-24: Visualisierungskonzept 2

Visualisierungskonzept 3

Das dritte Konzept ist in Abbildung 5-25 dargestellt. Die Längsdynamikinformation befindet sich in der Mitte des Rings und wird ähnlich der längsdynamischen Information aus Visualisierungskonzept 1 dargestellt. Der graue Ring repräsentiert auf abstrakte Weise das Fahrzeugumfeld. Der Pfeil in der linken Hälfte der Abbildung ist rot umrandet und zeigt an, dass der Wechsel nicht möglich ist. Außerdem repräsentieren die beiden Linien des Pfeils, die den Ring durchlaufen, den Wechselzeitraum. Der blaue Kreisringausschnitt symbolisiert die Lücke, die sich in dem dargestellten Beispiel von hinten nähert. Wenn die blaue Fläche innerhalb des Pfeils liegt, ist der Wechsel möglich. In diesem Fall färbt sich der Pfeil wie in der rechten Bildhälfte grün.

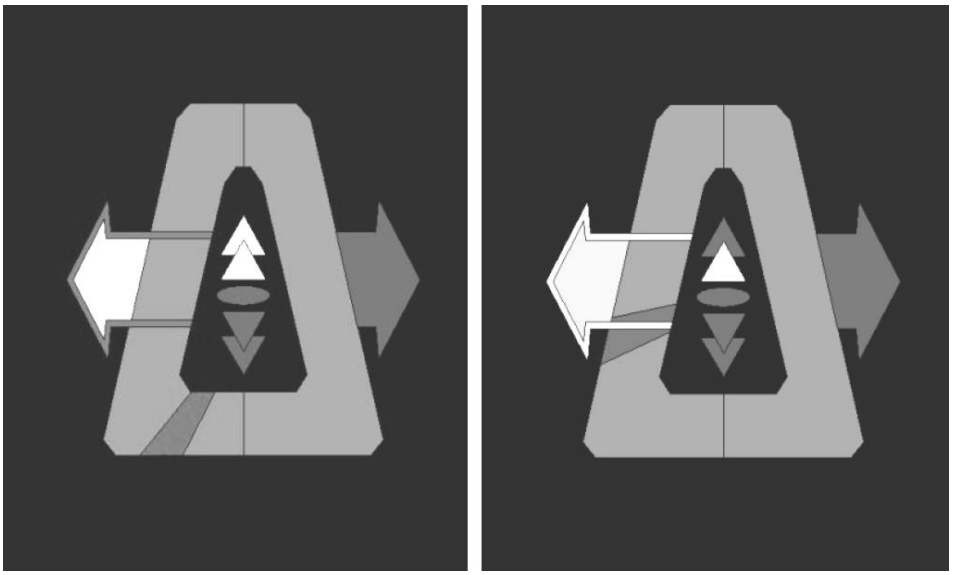


Abbildung 5-25: Visualisierungskonzept 3

Visualisierungskonzept 4

Das vierte Konzept ist in Abbildung 5-26 dargestellt. Die Längsdynamikinformation, deren Symbole mit der Darstellung in Konzept 1 identisch sind, wird zentral abgebildet. Die Zeitinformation wird durch einen vertikalen Balken neben der Längsdynamikinformation angezeigt. Liegt ein Fahrstreifenwechsel nach links vor, wird der Balken links grau abgebildet, liegt ein Wechsel nach rechts vor, erscheint die Information auf der rechten Seite. Der weiße Füllstand zeigt die Zeit bis zum ersten möglichen Fahrstreifenwechsel. Wenn der Wechsel möglich ist, färben sich der Pfeil und der Balken grün. Der Füllstand symbolisiert in diesem Zustand die Zeit bis zum Ende des Fahrstreifenwechsels.

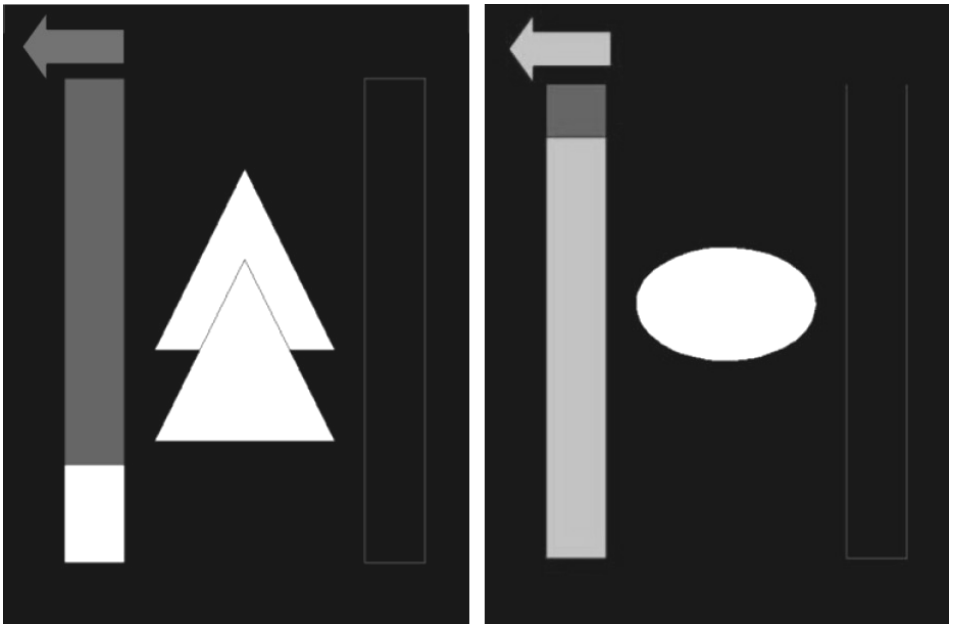


Abbildung 5-26: Visualisierungskonzept 4

5.5 Versuchsträgerintegration

Als Versuchsträger wurde der in Abbildung 5-27 dargestellte Honda Accord Tourer 2.2 i-DTEC, Baujahr 2008 eingesetzt, der mit LKAS und ACC ausgestattet ist. Zur Fahrbahnmarkierungserkennung verfügt das Fahrzeug über eine Kamera in der Frontscheibe. Zusätzlich wurde das Fahrzeug mit insgesamt sechs Radarsensoren ausgestattet. In der Front- und Heckschürze befinden sich jeweils zwei Bosch 77 GHz-Radarsensoren. In den hinteren Türen befindet sich links und rechts jeweils ein 24 GHz-Radarsensor der Firma Smart Microwave Sensors (SMS).

Abbildung 5-27: Prototypfahrzeug Honda Accord Tourer

Abbildung 5-28 zeigt den Aufbau der Hardware im Versuchsträger. Die Umfelddaten werden in einer dSPACE micro AutoBox fusioniert und in Form einer Objektliste über den Versuchs-CAN-Bus an die dSPACE AutoBox übermittelt. Über ein CAN-Gateway und den CAN-Bus werden zusätzlich Fahrzeuggrößen wie z.B. die Geschwindigkeit an die dSPACE AutoBox übertragen. Diese bestimmt die Handlungsempfehlung und sendet diese über einen weiteren CAN-Bus und ein CANCase an den HMI PC, der die CAN-Daten interpretiert und mittels DirectX die Visualisierung der Handlungsempfehlung auf einem Display realisiert. Des Weiteren steuert die dSPACE AutoBox mittels einer Digital/Analog-Wandlerkarte mit fünf analogen Ausgängen und einem Verstärker, der auf einem Transistor basiert, die drei LEDs im Außenspiegel an, die das HMI des LCDAS im Prototypfahrzeug umsetzen. Das Messsystem basiert auf der Software Dewesoft, die das synchrone Messen aller CAN-Signale und der insgesamt fünf Kamerasignale, die sowohl das Umfeld als auch das Display mit der visualisierten Manöverempfehlung aufzeichnen, ermöglicht.

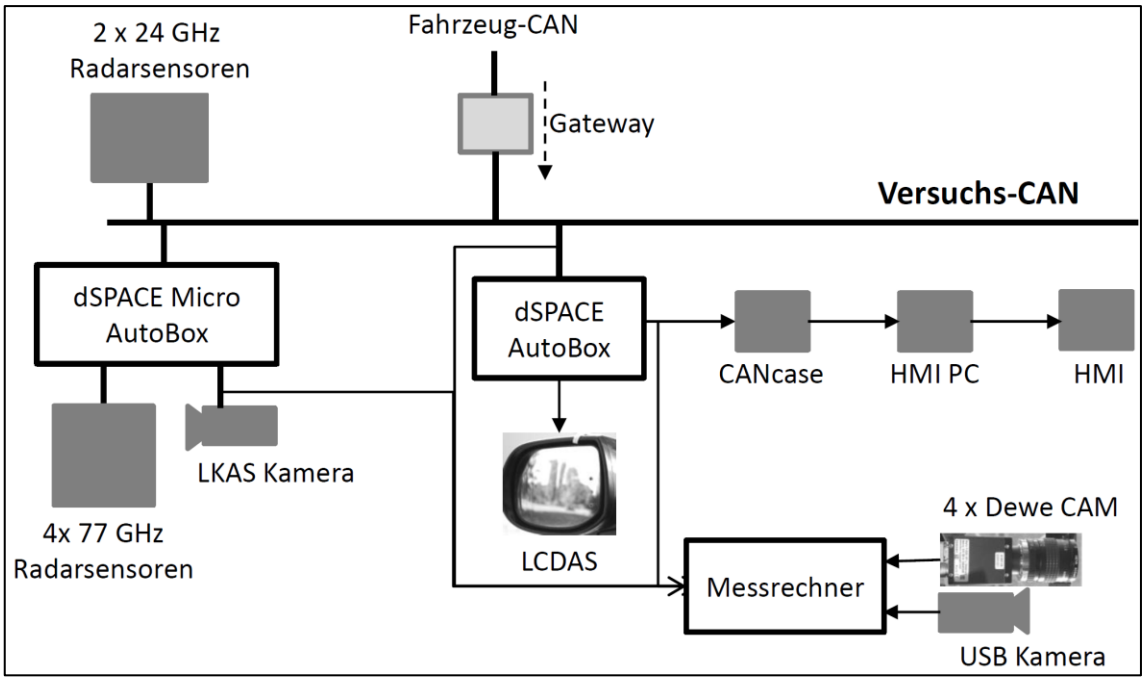


Abbildung 5-28: Topologie

6 Evaluation des manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenten

Der manöverbasierte Fahrstreifenwechselassistent wird mit 37 Probanden hinsichtlich Systemeindruck, Beanspruchung und Sicherheit im Vergleich zu Fahrten ohne System und mit LCDAS bewertet.

6.1 Lane Change Decision Aid System

In Anlehnung an die ISO 17387[157] wurde ein LCDAS vom Typ III realisiert, der die Funktionen *Blind Spot Warning* und *Closing Vehicle Warning* einschließt. Als Warnzone der Funktion *Blind Spot Warning* ist der benachbarte Fahrstreifen mit einem longitudinalen Abstand von -2 bis -7,75 m zur Fahrzeugfront festgelegt. Sobald sich ein Fahrzeug in diesem Bereich befindet, wird der Fahrer durch leuchtende LEDs informiert und bei Betätigung des Fahrtrichtungsanzeigers durch synchron blinkende LEDs gewarnt. Drei LEDs sind, wie Abbildung 6-1 zeigt, übereinander im linken Außenspiegel angeordnet.

Abbildung 6-1: Außenspiegel des Versuchsträgers mit optischem HMI-Element

Der Warnbereich ist für die *Closing Vehicle Warning* nach hinten bis zur maximalen Sensorreichweite festgelegt und eine Information durch leuchtende LEDs erfolgt beim Unterschreiten einer TTC von 3,5 s eines Fahrzeugs auf dem benachbarten Fahrstreifen bezogen auf die Front des EGO-Fahrzeugs. Betätigt der Fahrer in dieser Situation den Fahrtrichtungsanzeiger, wird er durch die blinkenden LEDs gewarnt.

[157] International Organization for Standardization 17387: LCDAS, 2008

Eine Aktivierung des Systems erfolgt beim Überschreiten einer Geschwindigkeit von 60 km/h.

6.2 Probandenkollektiv

Die Größe und die Repräsentativität des Probandenkollektivs haben entscheidenden Einfluss auf die Aussagekraft der Ergebnisse. So empfiehlt Bubb[158] die Bestimmung der Mindestgröße eines Probandenkollektivs N nach Formel 6.1 in Abhängigkeit der Anzahl der Merkmale k und deren Merkmalsausprägungen N_i. Damit nicht jede Kombination nur einmalig auftritt und eine statistische Auswertung einzelner Gruppen vorgenommen werden kann, ist die Gesamtzahl noch mit einer Zahl zwischen 3 und 10 zu multiplizieren.[159]

$$N \geq \prod_{i=1}^{k} N_i \qquad 6.1$$

Nach Fastenmeier[160] und Riedel[161] haben folgende Eigenschaften Einfluss auf das Verhalten im Straßenverkehr: Alter, Führerscheinbesitz, Fahrpraxis, berufliche Fahrzeugnutzung, jährliche Fahrleistung, Spaß am Auto fahren sowie Wertigkeit des Autos. Fastenmeier reduziert diese Eigenschaften auf die wesentlichen Einflussgrößen Alter oder Führerscheinbesitz und Fahrpraxis.[162]

Da ein Einfluss der Persönlichkeitseigenschaften Alter, Geschlecht und jährliche Fahrleistung auf das Versuchsergebnis erwartet wird, werden diese Merkmale ausgewählt. Der Einfluss der Merkmale wird nachfolgend erläutert.

Das Alter ist eines der klassischen Charakteristika zur Unterscheidung von Probandenkollektiven. Fastenmeier[163] beschreibt ausführlich die Unterschiede in der Leistungsfähigkeit von jungen und alten Fahrern: So besitzen ältere Fahrer viel Erfahrung und ein großes Verhaltensrepertoire für kritische Situationen. Dafür lassen die körperlichen Fähigkeiten insbesondere das Seh- und Hörvermögen sowie die Beweglichkeit der Arme und des Kopfes mit zunehmendem Alter nach. Junge Fahrer verfügen über wenig Erfahrung und haben ein hohes Unfallrisiko. Das gelernte Wissen wird erst durch Training in regelbasiertes und später teilweise in fertigkeitsbasiertes Verhalten überführt.

[158] Bubb: Wie viele Probanden braucht man?, 2003, S. 27

[159] Bubb: Wie viele Probanden braucht man?, 2003, S. 28

[160] Fastenmeier: Autofahrer und Verkehrssituation, 1995, S. 142 ff.

[161] Riedel et al.: Subjektive und objektive Beurteilung des Fahrverhaltens, 1998, S. 37

[162] Fastenmeier: Autofahrer und Verkehrssituation, 1995, S. 146 ff.

[163] Fastenmeier et al.: Zuverlässigkeit jüngerer und älterer Autofahrer, 2005

Außerdem weisen sie eine größere Risikobereitschaft auf.[164] Da die 18- bis 24-Jährigen das größte Unfallrisiko im Straßenverkehr innehaben[165], wird eine gesonderte Auswertung der jungen Fahrer bis 25 Jahren angestrebt. Eine eindeutige Altersgrenze für die Abnahme der physischen Fähigkeiten existiert nicht. Ilmarinen[166] definiert eine Altersgrenze bei etwa 50 Jahren, Tränkle[167] nennt das Alter zwischen 50 und 60 Jahren und Abendroth[168] stellte bereits bei 45- bis 50-Jährigen eine altersbedingte Veränderung fest.

Für Frauen und Männer lassen sich Unterschiede im räumlichen Vorstellungsvermögen nachweisen. Verursacht werden diese Differenzen vermutlich durch Hormone, wie z.B. Testosteron und durch den Aufbau und die Nutzung des Gehirns.[169] Ein Fahrstreifenwechsel stellt durch das Abschätzen der Geschwindigkeiten und Abstände sowie durch die Prädiktion der Fahrzeugbewegungen eine große Belastung des räumlichen Vorstellungsvermögens dar.

Der Fahrstreifenwechselassistent soll auf Straßen mit zwei Richtungsfahrbahnen eingesetzt werden, da auf diesen Strecken Fahrstreifenwechsel mit hoher Geschwindigkeit häufig auftreten. Diese Straßen sind in der Regel Autobahnen oder Schnellstraßen. Um eine jährliche Fahrleistung von mehr als 10.000 km zu erreichen, wird eine regelmäßige Autobahnnutzung und somit Erfahrung mit dem Unterstützungsszenario vorausgesetzt. Aus diesem Grund wird die jährliche Fahrleistung als drittes Merkmal verwendet.

Die Merkmale Geschlecht und jährliche Fahrleistung besitzen somit jeweils zwei Ausprägungen. Das Alter wird in den drei Ausprägungen jung (von 18 bis 33 Jahren), mittel (von 34 bis 49 Jahren) und alt (ab 50 Jahren) differenziert. Somit ergibt sich nach Formel 6.1 eine Mindestprobandenzahl von 36. Das Kollektiv, dessen Daten vollständig ausgewertet wurden, bestand aus insgesamt 37 Probanden. Die Altersspreizung des Kollektivs reichte von 18 bis 73 Jahren. 15 Probanden gehörten der Altersgruppe alt an, 11 Probanden zählten zu der mittleren Gruppe und 11 Fahrer zu der Gruppe der Jungen. An der Studie nahmen 17 Frauen und 20 Männer teil, dabei verfügten insgesamt 15 Fahrer über wenig Fahrleistung und 22 Fahrer über viel Fahrleistung.

Tabelle 6-1 zeigt die detaillierte Verteilung der einzelnen Gruppen. Die Altersgruppe der jungen Fahrer enthält nur einen Fahrer zwischen 25 und 33 Jahren. Somit besitzt diese Gruppe wie gefordert einen deutlichen Schwerpunkt im Bereich der 18- bis 25-Jährigen.

---

[164] Fastenmeier et al.: Zuverlässigkeit jüngerer und älterer Autofahrer, 2005, S. 116

[165] Statistisches Bundesamt: Unfälle von 18-24-Jährigen im Straßenverkehr 2010, 2011

[166] Ilmarinen et al.: Arbeitsfähigkeit 2010, 2002

[167] Tränkle et al.: Schwierigkeiten Jüngerer und Älterer, 1992, S. 58

[168] Abendroth: Abstandsregelsystem, 2001

[169] Maier: Räumliches Vorstellungsvermögen, 1999, S. 169 ff.

Tabelle 6-1: Zusammensetzung des Probandenkollektivs (Probandenanzahl)

Probandenkollektiv	37											
Geschlecht	weiblich 17						männlich 20					
Fahrleistung	< 10.000 km 8			> 10.000 km 9			< 10.000 km 7			> 10.000 km 13		
Alter	alt	mittel	jung	alt	mittel	jung	alt	mittel	jung	alt	mittel	jung
	3	1	4	4	4	1	1	3	3	7	3	3

Neben den soziodemographischen Daten wird als weiteres Merkmal die Technikaffinität verwendet. "Technikaffinität repräsentiert die Begeisterung und die Kenntnis neuartiger, technischer Produkte und technischer Zusammenhänge."[170] Die Gesellschaft unterliegt einer fortschreitenden Technisierung z.B. mit Smartphones, Tablet-PCs, elektronischen Wahlautomaten und mehreren PCs in jedem Haushalt. In der Bevölkerung werden diese technischen Hilfsmittel als zusätzliche Freiheit und Erleichterung aufgefasst oder sie werden als einschränkend empfunden und es wird ihnen eher ablehnend begegnet.[171] Es ist davon auszugehen, dass die Technikaffinität einen Einfluss auf die Bewertung des manöverbasierten Assistenzsystems hat, das ein neues und zusätzliches System im Fahrzeug sein wird. Die Technikaffinität wird mittels 8 Fragen ermittelt, die auf einer 6-stufigen Ordinalskala zu beantworten sind. Der Median aller Antworten bestimmt, ob der Fahrer technikaffin ist oder nicht. Eine detailliertere Abstufung des Merkmals findet nicht statt. Der Fragebogen zur Technikaffinität befindet sich im Anhang in Tabelle 8-1. Die Korrelation zwischen den Merkmalen Geschlecht, Alter, Fahrleistung und Technikaffinität zeigt Tabelle 6-2.

[170] Sommerfeld: Versuchsdesign zur Komfortbewertung, 2011, S. 26

[171] Sackmann et al.: Technisierung des Alltags, 1994

Tabelle 6-2: Korrelation zwischen den Merkmalen Geschlecht, Alter, Fahrleistung und Technikaffinität

Merkmal	**Ausprägung**	**technikaffin**		**nicht technikaffin**		**gesamt**	
		Anzahl	Anteil	Anzahl	Anteil	Anzahl	Anteil
Geschlecht	männlich	17	59 %	3	37 %	20	54 %
	weiblich	12	41 %	5	63 %	17	46 %
Alter	jung	9	31 %	2	25 %	11	30 %
	mittel	11	38 %	0	0 %	11	30 %
	alt	9	31 %	6	75 %	15	41 %
Fahrleistung	gering	13	45 %	2	25 %	15	41 %
	groß	16	55 %	6	75 %	22	59 %
Summe		29		8		37	

So sind die technikaffinen Probanden im Vergleich zum Probandenkollektiv eher mittleren und jungen Alters. Die nicht technikaffinen Probanden sind überwiegend weiblich, jung und besitzen eine große Fahrleistung.

6.3 Versuchsablauf

Das relevante Szenario ist ein Fahrstreifenwechsel aufgrund eines langsameren, vorausfahrenden Fahrzeugs. Auf dem Zielfahrstreifen fahren schnellere Fahrzeuge. Anhand dieses Szenarios ist der manöverbasierte Fahrstreifenwechselassistent zu bewerten.

Zur Beurteilung von Fahrerassistenzsystemen sind Probandenversuche im Feld oder im Simulator möglich. Feldversuche bieten einen hohen Echtheitsgrad der Testbedingungen[172] und liefern damit aussagekräftigere Ergebnisse und bieten darüber hinaus die Möglichkeit, die technische Machbarkeit zu bewerten. Somit wird trotz des geringeren Aufwands auf Versuche im Simulator verzichtet. Fahrversuche im öffentlichen Straßenverkehr sind mit dem Prototypfahrzeug aus Sicherheitsgründen nicht möglich. Folglich sind die Fahrversuche auf einem Testgelände mit ausreichender Ausweichfläche und kontrollierbaren Bedingungen durchzuführen.

Das verfügbare Testgelände ist ein Flugplatz und verfügt über eine ca. 1 km lange Start- und Landebahn und, wie Abbildung 6-2 zeigt, einen parallel verlaufenden Taxiway.

[172] Bruder et al.: Nutzen von Fahrversuchen für die Gestaltung, 2007, S.81 ff.

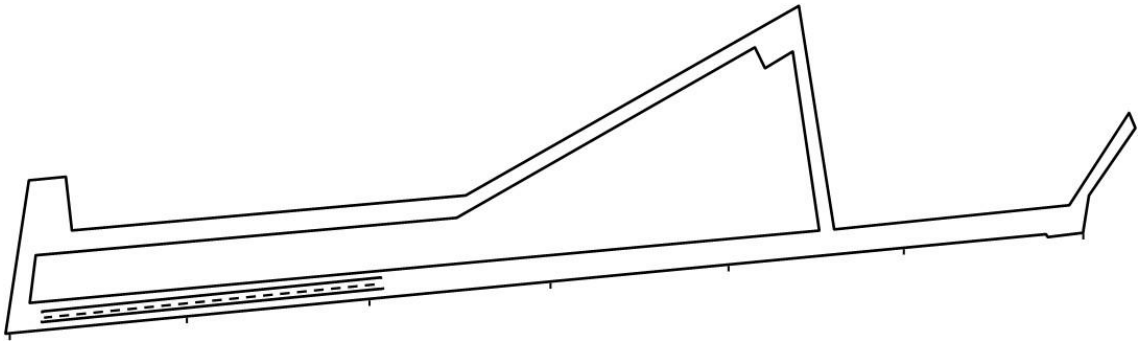


Abbildung 6-2: Versuchsgelände der Technischen Universität Darmstadt

Für eine größtmögliche Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse ist die Verkehrssituation möglichst realitätsnah darzustellen. Aus diesem Grund besitzt die Teststrecke zwei gleichgerichtete Fahrstreifen, die durch eine farbige Fahrbahnmarkierung von 500 m Länge und durch Markierungsnägel auf einer Länge von ca. 400 m gekennzeichnet sind.

Zur Steigerung der Realitätsnähe wurden Verkehrsschilder nach Straßenverkehrsordnung (StVO) aufgestellt und insgesamt bewegten sich vier Fahrzeuge im Umfeld des Versuchsfahrzeugs. So wurde für das vorausfahrende Fahrzeug ein Kastenwagen verwendet, um den Überholwunsch wegen der Sichtbehinderung zu verstärken. Die drei Fahrzeuge fuhren auf dem benachbarten Fahrstreifen wie in Abbildung 6-3 dargestellt. Eine größere Anzahl an Fahrzeugen ist aus Gründen der limitierten Streckenlänge und dem zunehmendem Aufwand hinsichtlich Technik und Personal nicht darstellbar. Die Geschwindigkeiten während der Versuchsfahrten lagen im Bereich von 70 bis 100 km/h.

Abbildung 6-3: Versuchsfahrzeuge kurz nach dem Start des Szenarios

Um das Szenario reproduzierbar zu gestalten, wurden die Abstände aller Fahrzeuge untereinander in der Startaufstellung festgelegt. Vor dem Probandenfahrzeug stand der Kastenwagen und die drei weiteren Fahrzeuge standen hinter dem Probandenfahrzeug auf dem benachbarten, linken Fahrstreifen hintereinander. Die Abstände der drei Fahrzeuge wurden über den Versuch durch die trainierten Fahrer konstant gehalten. Der Einsatz von ACC zur reproduzierbaren Lückendarstellung zwischen den Fahrzeugen wurde erprobt und brachte aufgrund der trägen Systemreaktion nicht den gewünschten Erfolg.

Direkt am Startpunkt waren ein Überholverbotsschild sowie ein Schild zur Beschränkung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit auf 70 km/h aufgestellt. Beide Beschränkungen wurden nach ca. 400 m mittels des Schildes „Ende sämtlicher Streckenverbote“

aufgehoben. Der Proband bekam die Anweisung, sich an die Verkehrsregeln zu halten, möglichst 90 km/h zu fahren und, wenn erforderlich, zu überholen. Somit war der früheste Überholpunkt auf den Bereich auf Höhe des Aufhebungsschildes definiert. Der Fahrer im ersten nachfolgenden Fahrzeug fuhr an dieser Stelle mit ca. 90 km/h möglichst exakt im toten Winkel des Probandenfahrzeugs und überholte es im weiteren Verlauf. Der Proband hatte so mehrere mögliche Lücken, zwischen den er wählen musste. Am Ende der Versuchsstrecke wurde gewendet und zum Ausgangspunkt zurückgefahren.

Eine Auswertung der Messdaten zeigt, dass die Lücke zwischen den ersten beiden Fahrzeugen auf dem Zielfahrstreifen im Mittel über alle Systemvarianten bei 37 m lag. Der Proband hat auf Höhe des Aufhebungszeichens das erste Mal die Möglichkeit zum Fahrstreifenwechsel und bewertet die Lücken. Aus diesem Grund beziehen sich die nachfolgenden Betrachtungen auf diesen Zeitpunkt, der näherungsweise 8 s nach Messungsstart liegt. Tabelle 6-3 zeigt die mittlere Lückengröße $\bar{d}$, die Standardabweichung σ und die Zahl der berücksichtigten Lücken n für die Fahrten ohne System, mit LCDAS und mit dem manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenten (FSWA). Die Anzahl der Lücken unterscheidet sich für die Systemvarianten, da teilweise vor das erste Fahrzeug auf dem benachbarten Fahrstreifen gewechselt wurde, bevor die erste Lücke im Erfassungsbereich lag. Die Nullhypothese, dass die Lücken gleich groß sind, kann mittels eines zweiseitigen Wilcoxon-Test und dem Signifikanzniveau von 5 % nicht falsifiziert werden. Die Tabelle zeigt, den Signifikanzwert p der jeweiligen Variante im Vergleich zur Variante mit manöverbasiertem Fahrstreifenwechselassistenten. Die Werte liegen deutlich über 5 %.

Tabelle 6-3: Größe der ersten Lücke auf dem Zielfahrstreifen

Systemvariante	$\bar{d}$	σ	n	p
ohne System	37,5 m	6,5 m	97	0,78
LCDAS	35,9 m	7,2 m	113	0,14
FSWA	37,4 m	7,1 m	117	

Die zweite Lücke zwischen dem zweiten und dritten Fahrzeug auf dem Zielfahrstreifen ist nicht statistisch auswertbar, da zu dem betrachteten Zeitpunkt keine ausreichende Anzahl an Messwerten verfügbar ist. Trotz einer großen Sensorreichweite von circa 200 m betrug die Reichweite der Daten aus der Sensorfusion nur circa 65 m. Die Lückengröße ist zu einem späteren Messzeitpunkt nicht auswertbar, da die Varianz der Szenarien zu groß ist, um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

Das Szenario wurde in zwei Varianten ausgeführt:

- der vorausfahrende Kastenwagen beschleunigte und fuhr konstant mit 70 km/h

- der vorausfahrende Kastenwagen beschleunigte auf 70 km/h und verzögerte ca. 100 m nach dem Aufhebungsschild um ca. 10 km/h, um die Belastung für den Probanden zu steigern

Die Versuche fanden im Sommer tagsüber bei trockener Witterung statt und somit waren die Wetterverhältnisse und die Umweltbedingungen nahezu konstant.

Durch Kombination von zwei Systemen (LCDAS, FSWA) plus Baseline ohne System, zwei Szenarien (Kastenwagen verzögert, Kastenwagen fährt konstant) und zwei Verfahren zur Beanspruchungserfassung (NASA TLX, Nebenaufgabenmaß), die im Kapitel 6.5 erläutert werden, ergeben sich insgesamt zwölf Runden. Zum Kennenlernen des Fahrzeugs und der Versuchsstrecke wurden zwei zusätzliche Runden zu Beginn gefahren. Den manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenten bekam der Proband im Gespräch vor den Fahrversuchen anhand von Abbildungen und eines Videos erläutert und eine zusätzliche Kennenlernrunde wurde eingeplant. Somit ergaben sich je Proband insgesamt 15 Runden. Die Systemvarianten wurden nacheinander bewertet. Um Lerneffekte auszuschließen, wurde die Reihenfolge der Systeme variiert.

Die Messungen wurden einheitlich nach 300 m gestartet und am Ende der Versuchsstrecke gestoppt.

6.4 Subjektiver Systemeindruck

Nach der Durchführung der Fahrversuche wurden die Probanden nach Ihrem Systemeindruck befragt. Auf einer sechsstufigen Skala bewerteten die 37 Fahrer den manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenten anhand von Aussagen hinsichtlich Intuitivität, Entlastung, Komfort und Informationsdarstellung mittels ihrem Grad der Zustimmung zwischen den Extremen „trifft sehr zu“ bis „trifft gar nicht zu“. Einzelne Probanden machten keine Angaben (k. A.).

Abbildung 6-4 zeigt den ersten Teil des Ergebnisses der subjektiven Bewertung. Die Kugelflächen spiegeln die Anzahl der Nennungen wider.

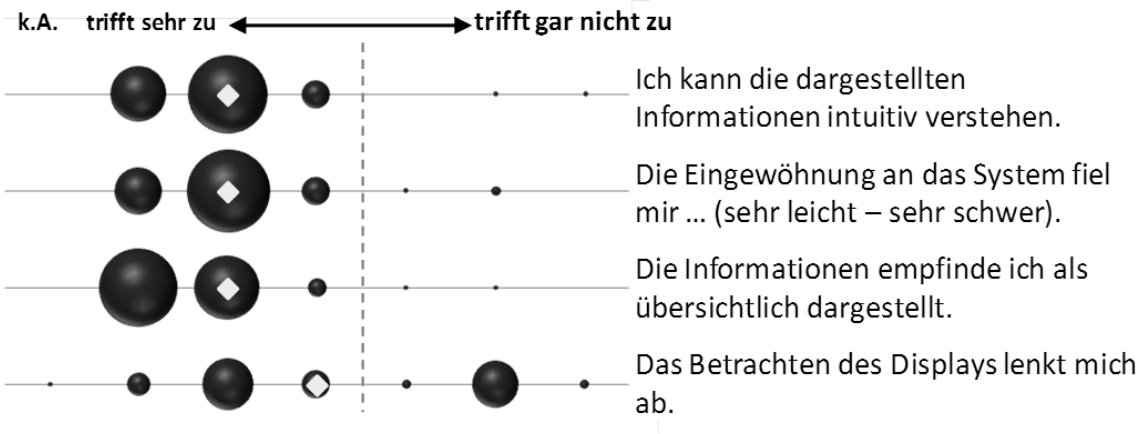


Abbildung 6-4: Systemeindruck – Teil 1 (Kugelfläche entspricht Häufigkeit der Nennung; vertikale, gestrichelte Linie ist die mittlerer Bewertungsstufe; Raute zeigt den Median)

Der Median ist jeweils durch eine Raute markiert und zur Verbesserung der Lesbarkeit sind die dritte und die vierte Bewertungsstufe, die die Mitte der Skala bilden, durch eine vertikale, gestrichelte Linie voneinander getrennt.

Die Aussagen zur intuitiven Informationsdarstellung und zur einfachen Systemeingewöhnung wurden überwiegend als zutreffend bewertet. Nennungen im rechten, aussagennegierenden Bereich sind kaum aufgetreten. Die Probanden empfinden das System somit als intuitiv. Diese Bewertung war so nicht zu erwarten, da die Manöverempfehlung eine Vielzahl an Informationen enthält und die Probanden lediglich eine einzelne Eingewöhnungsrunde fuhren, um das System kennenzulernen.

Des Weiteren empfinden die meisten Probanden die Darstellung der Informationen als übersichtlich. Allerdings fallen die Bewertungen zur Ablenkung des Displays recht unterschiedlich aus und der Median liegt mittig. Um die Manöverempfehlungen wahrzunehmen, muss der Fahrer seinen Blick von der Straße abwenden und die Helligkeit (Adaption) und die Schärfe (Akkommodation) müssen auf das Display angepasst werden. Dies verlängert die Wahrnehmungszeit und wirkt somit ablenkend. Mit einem

Head-Up-Display sind vermutlich bessere Ergebnisse zu erzielen, da diese Nachteile vermieden werden können.[173]

Der zweite Teil der Ergebnisse zum Systemeindruck ist in Abbildung 6-5 dargestellt.

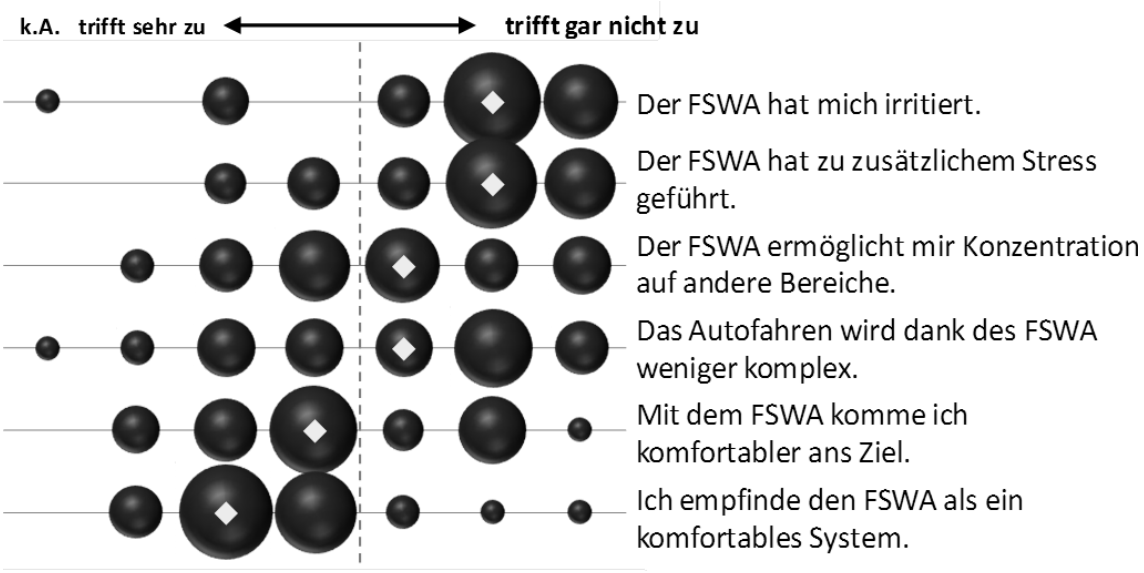


Abbildung 6-5: Systemeindruck – Teil 2 (Kugelfläche entspricht Häufigkeit der Nennung; vertikale, gestrichelte Linie ist die mittlerer Bewertungsstufe; Raute zeigt den Median)

Die Aussage, dass der manöverbasierte Fahrstreifenwechselassistent die Probanden irritiert, wurde überwiegend und deutlich negiert. Ebenso findet die Mehrheit der Probanden nicht, dass der FSWA zusätzlichen Stress verursacht. In den nächsten beiden Aussagen zur Belastungs- und Komplexitätsreduktion fallen die Bewertungen nicht eindeutig aus. Das Empfinden der Probanden tendiert zur Mitte. Eine spürbare Entlastung und Komplexitätsreduktion nach insgesamt fünf Fahrstreifenwechseln war allerdings auch nicht zu erwarten. So schließt Weinberger[174] aus einer Probandenstudie auf eine Lernphase für ACC von mindestens zwei Wochen mit 2.600 km Fahrleistung im öffentlichen Straßenverkehr mit einem vertrauten Fahrzeug.

Trotzdem wird der manöverbasierte Fahrstreifenwechselassistent von der Mehrheit der Probanden als ein komfortables System empfunden.

[173] Färber: Automobile Zukunft, 2004, S. 129

[174] Weinberger: Einfluss von Adaptive Cruise Control Systemen auf das Fahrerverhalten, 2001, S. 82

6.5 Fahrerbeanspruchung

6.5.1 Belastung und Beanspruchung

Die Fahrerbelastung ist die Summe aller Einflüsse, die auf den Fahrer von außen eintreffen und auf ihn einwirken, während die Beanspruchung die unmittelbare Auswirkung der Belastung darstellt, die von den individuellen Fähigkeiten und Eigenschaften des Fahrers abhängig ist.[175] Somit lassen sich die Einflussfaktoren auf die Fahrerbeanspruchung in objektive und subjektive Faktoren gliedern.[176] Zu den objektiven Einflüssen zählen die Verkehrsdichte und die Straßenkategorie. Die interindividuellen Unterschiede z.B. die Fahrerfahrung und die intraindividuellen Unterschiede, z.B. die durch Alkohol und Ermüdung beeinflusste Aufmerksamkeit, zählen zu den subjektiven Einflussfaktoren.

6.5.2 Methoden zur Erfassung der Fahrerbeanspruchung

Zur Eignungsbeurteilung von Beanspruchungserfassungsmethoden haben O'Donnel und Eggemeier[177] fünf Kriterien definiert: Sensitivität, Diagnostizität, Intrusion, Aufwand und Anwenderakzeptanz. „Die Sensitivität beschreibt die Fähigkeit eines Verfahrens, Änderungen im Niveau der Beanspruchung zu erfassen.“[178] Ein Verfahren mit hoher Diagnostizität ist im Stande zu detektieren, welches Teilsystem des menschlichen Informationsverarbeitungsprozesses beansprucht ist und welche Teilsysteme noch Ressourcen bieten.[170] Das Kriterium der Intrusion beurteilt die Beeinflussung der Hauptaufgabe durch das Messverfahren.[170]

Zur Erfassung der Fahrerbeanspruchung existieren subjektive bzw. selbstbeurteilende, leistungsbezogene und physiologische Verfahren.

Zur Beanspruchungserfassung mit subjektiven Verfahren schätzt der Proband seine persönliche Erfahrung von Beanspruchung ein und dokumentiert diese meist auf Fragebögen oder mittels Bewertungsskalen. Der Proband kann die Beanspruchung am präzisesten bewerten.[179] Des Weiteren ist ein geringer Implementierungsaufwand erforderlich, die Intrusion ist sehr gering, allerdings ist die Diagnostizität meist auch gering.

Zu den leistungsbezogenen Verfahren zählen die Hauptaufgabenmaße, die durch Messen der Leistung des Probanden beim Erfüllen seiner Primäraufgabe, die Beanspru-

[175] nach International Organization for Standardization: ISO 10075: Arbeitsbelastung, 2000, Teil 1, S. 3

[176] Hering: Messung kognitiver Beanspruchung im Straßenverkehr, 1999, S. 6

[177] O'Donnell et al.: Workload Assessment Methodology, 1986

[178] aus dem Englischen übersetzt: O'Donnell et al.: Workload Assessment Methodology, 1986, S. 42 – 2

[179] O'Donnell et al.: Workload Assessment Methodology, 1986, S. 42 – 31

chung ableiten, und die Nebenaufgabenmaße. Diese erfassen die Leistung des Probanden beim Erfüllen einer Nebenaufgabe und leiten daraus Rückschlüsse auf die Beanspruchung des Probanden durch die Hauptaufgabe ab. Hauptaufgabenmaße sind nur zur Erfassung mittlerer Beanspruchungen geeignet.[180] Eine Vorhersage des Maßes der Beanspruchung ist allerdings nicht möglich.[181] Nebenaufgabenmaße sind sensitiver als Hauptaufgabenmaße und sie besitzen einen höheren Grad an Diagnostizität, wenn durch die Hauptaufgabe und die Nebenaufgabe die gleiche Ressource beansprucht wird.[182] Bei der Gestaltung der Nebenaufgabe ist die Intrusion gering zu halten, um den Fahrer nicht zu gefährden. Des Weiteren kann es zur Ressourcenverlagerung von der Hauptaufgabe zur Nebenaufgabe kommen.

Zu den physiologischen Messverfahren zählen Messungen zur Aktivität von Hirn und Herz-Kreislauf-System, der Muskeln, der Haut und der Augen.

Für die Erfassung der Beanspruchung mittels physiologischer Verfahren wird der Proband während eines Fahrstreifenwechsels auf dem Testgelände nach Expertenmeinung nicht ausreichend emotional beansprucht. Aus den zahlreichen subjektiven Verfahren wurde aufgrund der Popularität und der Validität der NASA Task Load Index (TLX) als geeignet identifiziert. Dabei gab der Proband auf einer siebenstufigen Skala seine subjektive Bewertung der sechs Kriterien „Mentale Anforderung“, „Körperliche Anforderung“, „Zeitliche Anforderung“, „Aufgabenerfüllung“, „Frustration“ und „Anstrengung“ wider. Zusätzlich wurde eine Nebenaufgabe entwickelt. Dem Probanden wird eine Zahlenreihe fortlaufender, ungerader Zahlen vorgelesen. Dabei wird jede dritte Zahl ausgelassen und ist vom Probanden zu ergänzen. Abbildung 6-6 zeigt einen Ausschnitt der abgespielten Tonspur mit der ungeraden Zahlenfolge.

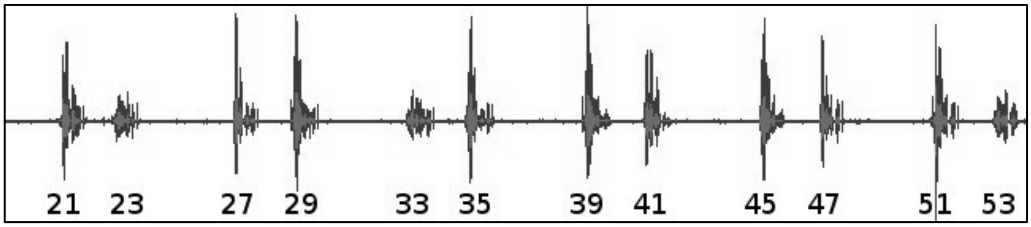


Abbildung 6-6: Ausschnitt der Tonspur der ungeraden Zahlenfolge

Als Maß für die Leistungsfähigkeit wird die zeitliche Abweichung zwischen dem Zeitpunkt der Nennung der Zahl durch den Probanden und dem aus der Tonspur ermittelten idealen Zeitpunkt ermittelt und mit Punkten bewertet. Die Auswertung der 37 Probandendatensätze erfolgte mittels MATLAB/Simulink.

---

[180] O'Donnell et al.: Workload Assessment Methodology, 1986, S. 42 – 3 ff.

[181] O'Donnell et al.: Workload Assessment Methodology, 1986, S. 42 – 21

[182] O'Donnell et al.: Workload Assessment Methodology, 1986, S.42 – 4

6.5.3 Resultate Task Load Index

Die Beanspruchungsreduktion durch LCDAS und FSWA für die Gesamtheit der Probanden wird analysiert und diskutiert. Die Optimierung für die einzelnen Probandengruppen, die sich anhand Ihrer Merkmalsausprägungen voneinander unterscheiden, z.B. junge und alte Probanden, werden bewertet. Als letzte Auswertung erfolgt die Beantwortung der Frage, ob einzelne Probandengruppen mit allen drei Systemvarianten (ohne System, mit LCDAS, mit FSWA) stärker beansprucht waren als andere Gruppen des gleichen Merkmals, um so die Beanspruchung während des Fahrstreifenwechsels auf dem Testgelände gruppenindividuell zu beurteilen.

Abbildung 6-7 zeigt die subjektive Beanspruchung der 37 Probanden als kumulierte Häufigkeit der Beanspruchungspunkte. Je größer die Anzahl der Punkte, desto weiter rechts liegt der Verlauf und desto größer ist die Beanspruchung.

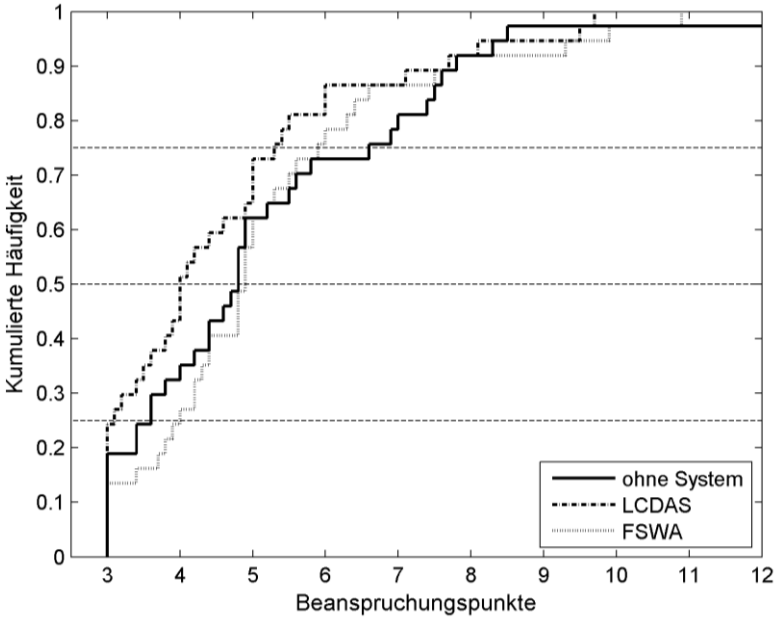


Abbildung 6-7: Subjektive Beanspruchung von 37 Probanden als kumulierte Häufigkeit

Der Median des Beanspruchungsempfindens der Fahrten ohne System und mit FSWA beträgt 4,8 bzw. 4,9. Der Median der Fahrt mit LCDAS liegt bei einem Wert von 4,0.

Die Probanden haben die Beanspruchung mit LCDAS im Mittel am geringsten empfunden. Allerdings lässt sich dies statistisch nicht signifikant nachweisen. Die verwendeten Signifikanzniveaus sind 5 % für signifikant, 1 % für hochsignifikant und 0,1 % für höchstsignifikant.[183,184] Der Signifikanzwert des Zweistichproben-t-Test abhängiger Stichproben für die Alternativhypothese, dass die Erwartungswerte der Beanspruchungspunkte für die Fahrten mit LCDAS kleiner als ohne System sind, beträgt 18 %.

[183] Bubb: Wie viele Probanden braucht man?, 2003, S. 32

[184] Bortz: Statistik für Sozialwissenschaftler, 1999, S. 114

Eine Erhöhung der Beanspruchung mit FSWA oder LCDAS ist statistisch wie die Reduktion der Beanspruchung nicht nachweisbar.

Bei einer intraindividuellen Auswertung lässt sich ebenfalls die Nullhypothese der Gleichheit der Verteilungen nicht falsifizieren und der Erkenntnissgewinn wird auch bei Auswertung der sechs einzelnen Kriterien „Mentale Anforderung“, „Körperliche Anforderung“, „Zeitliche Anforderung“, „Aufgabenerfüllung“, „Frustration“ und „Anstrengung“, die summiert die in Abbildung 6-7 dargestellten Beanspruchungspunkte ergeben, nicht erhöht, da keine statistisch signifikanten Unterschiede nachweisbar sind. Die Beanspruchung mit LCDAS ist im Mittel stets am geringsten und die Beanspruchungspunkte ohne System und mit FSWA sind im Mittel etwa gleich groß. Die ausführliche Auflistung aller Werte befindet sich im Anhang in Tabelle 8-2.

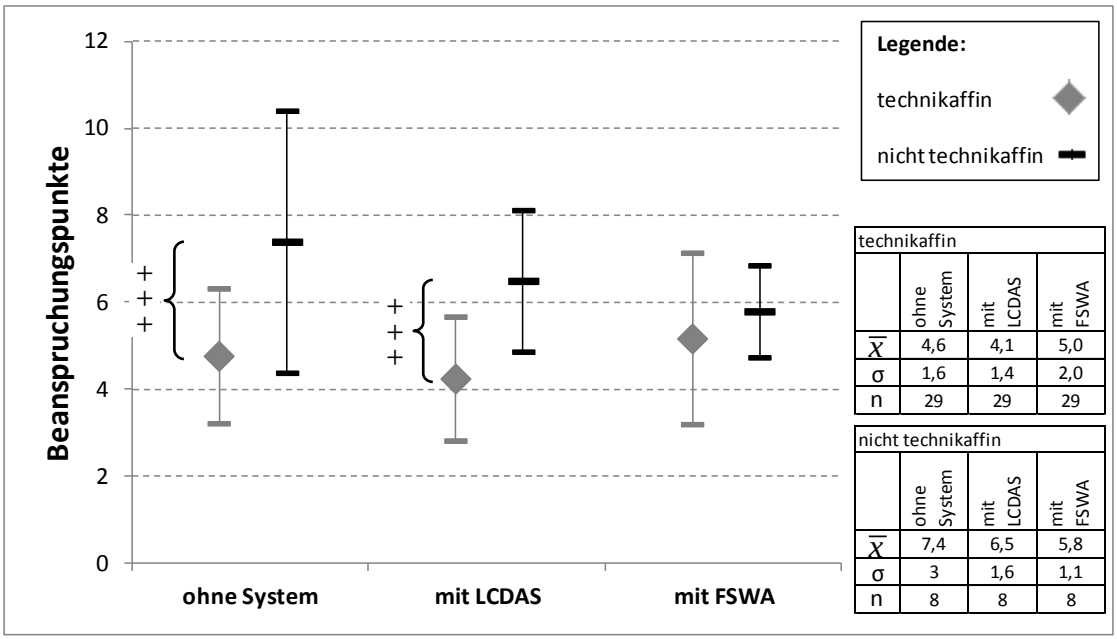
Die Auswertung einzelner Probandengruppen, deren Gruppenzugehörigkeit durch die Merkmale Fahrleistung, Alter und Geschlecht und deren Ausprägungen definiert sind, zeigt ebenfalls keine signifikanten Ergebnisse hinsichtlich der Unterschiede zwischen den Varianten „ohne System“, „mit LCDAS“ und „mit FSWA“. Die Rangordnung ist stets mit der Ordnung des gesamten Probandenkollektivs identisch. Tabelle 8-3 im Anhang enthält die detaillierten Ergebnisse.

Als Ursache für das Ausbleiben einer Beanspruchungsreduktion bei der Nutzung des manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenzsystems kommen in erster Linie die Eignung des Testverfahrens, der Versuchsablauf und das System selbst in Frage. Das Testverfahren könnte keine ausreichende Sensitivität aufweisen oder die Probanden schätzen bei diesem subjektiven Verfahren ihre eigene Beanspruchung falsch ein. Die zuletzt genannte Ursache soll mit der Messung der Leistung beim Erfüllen einer Nebenaufgabe im folgenden Kapitel untersucht werden. Der prototypische Zustand sowohl der Funktionalität als auch der Mensch-Maschine Schnittstelle kann einen Einfluss auf die Ergebnisse haben. So traten beim starken Beschleunigen der Fahrzeuge auf dem Zielfahrstreifen zu Beginn des Szenarios sehr schnelle Zeitänderungen in der Visualisierung auf. So kann dieser erste Eindruck das Ergebnis zu Ungunsten des FSWA beeinflusst haben. Darüber hinaus war das Display auf dem Armaturenbrett angebracht, entsprach also nicht der üblichen Optik von Serienfahrzeugen, was zu einer weiteren Beeinflussung der Probanden führen kann. Des Weiteren war die auf einem Testgelände dargestellte Situation vielleicht nicht ausreichend belastend, so dass Bodeneffekte[185] auftraten. So treten bei Autobahnfahrten im Unterschied zu dem Szenario auf dem Versuchsgelände größere Geschwindigkeiten und mehr Fahrzeuge auf. Außerdem sind die Witterungsverhältnisse häufig schlechter. Darüber hinaus wissen die Probanden, dass sie auf einem Testgelände keinem großen Sicherheitsrisiko ausgesetzt werden. Den größten Einfluss auf dieses Ergebnis hat vermutlich die mit einer Runde sehr kurze Kennenlernphase des FSWA, die beispielsweise für ein ACC-System zum Nachweis

[185] Messfehler durch Unterschreiten des Messbereichs

einer eindeutigen Komfortsteigerung, wie bereits erläutert, nach Weinberger[186] bei zwei Wochen mit 2.600 km Fahrleistung im öffentlichen Straßenverkehr liegt. Eine Versuchsphase von mehreren Tagen je Proband ist in diesem Entwicklungsstadium nicht realisierbar und aus Sicherheitsgründen im öffentlichen Straßenverkehr nicht möglich. Abschließend bleibt festzuhalten, dass die Ursachen für die fehlenden Unterschiede in der Beanspruchung der Probanden zwischen den Systemvarianten nicht eindeutig zu identifizieren sind, aber eine erneute Bewertung des Systems zu einem späteren Entwicklungszeitpunkt mit einer längeren Kennenlernphase das größte Potenzial zur Messung einer Beanspruchungsreduktion verspricht. Um einen signifikanten Unterschied für das LCDAS nachzuweisen, kann auch eine größere Anzahl an Probanden erfolgreich sein, da die statistischen Kennwerte, z.B. der Median, eine Beanspruchungsreduktion vermuten lassen.

Lediglich die Analyse des Merkmals Technikaffinität zeigt ein anderes Resultat. So zeigt Abbildung 6-8, dass die Rangordnung für die Gruppe der nicht technikaffinen Probanden sich verschiebt.



technikaffin

	ohne System	mit LCDAS	mit FSWA
$\overline{x}$	4,6	4,1	5,0
σ	1,6	1,4	2,0
n	29	29	29

nicht technikaffin

	ohne System	mit LCDAS	mit FSWA
$\overline{x}$	7,4	6,5	5,8
σ	3	1,6	1,1
n	8	8	8

Abbildung 6-8: Subjektive Beanspruchung der technikaffinen und nicht technikaffinen Probanden mit Mittelwert $\overline{x}$, Standardabweichung σ und Probandenanzahl n und Signifikanzniveau (+++ $\hat{=}$ höchstsignifikant)

Während die Mittelwerte der technikaffinen Probandengruppe zwischen 4,1 und 5 liegen, sinkt der Mittelwert der nicht technikaffinen Probandengruppe ohne System von 7,4 auf 6,5 mit LCDAS und auf 5,8 mit FSWA. In der gleichen Reihenfolge nimmt die Streuung ab. Allerdings lässt sich mittels des t-Tests weder die Gleichheit noch die Ungleichheit der Verteilungen falsifizieren.

[186] Weinberger: Einfluss von Adaptive Cruise Control Systemen auf das Fahrerverhalten, 2001, S. 82

Darüber hinaus zeigt Abbildung 6-8 einen Unterschied in der Beanspruchung zwischen technikaffinen und nicht technikaffinen Probanden jeweils für die Fahrten ohne System und mit LCDAS. Dies wird durch den einseitigen t-Test als höchstsignifikant bestätigt. Die Werte sind Tabelle 6-4 zu entnehmen. Folglich waren die nicht technikaffinen Probanden bei den Fahrten ohne System und mit LCDAS signifikant stärker beansprucht als die technikaffinen Probanden. Als Ursache werden ein besseres Systemverständnis sowie die Begeisterung für Technik als beeinflussender Faktor für die subjektive Bewertungsmethode vermutet.

Tabelle 6-4: Signifikanzwerte des einseitigen t-Tests der technikaffinen und nichttechnikaffinen Probandengruppen für jeweils eine Systemvariante

Systemvariante	**Signifikanzwert p**
ohne System	< 0,1 %
mit LCDAS	< 0,1 %
mit FSWA	16,1 %

Eine Auswertung des Probandenkollektivs differenziert nach einzelnen Merkmalen und unabhängig von der Systemvariante zeigt folgende Resultate.

Zwischen den männlichen und weiblichen Probanden lässt sich keine Unterscheidung feststellen. Abbildung 8-4 im Anhang zeigt die kumulierte Häufigkeit der Verteilungen.

Abbildung 6-9 zeigt links eine deutliche höhere, höchstsignifikante Beanspruchung der nichttechnikaffinen Probanden (Median = 6 Punkte) gegenüber den technikaffinen Fahrern (Median = 4,2). Ebenso fühlen sich die jungen Probanden signifikant stärker beansprucht als die älteren Probanden, wie in Abbildung 6-9 rechts dargestellt ist.

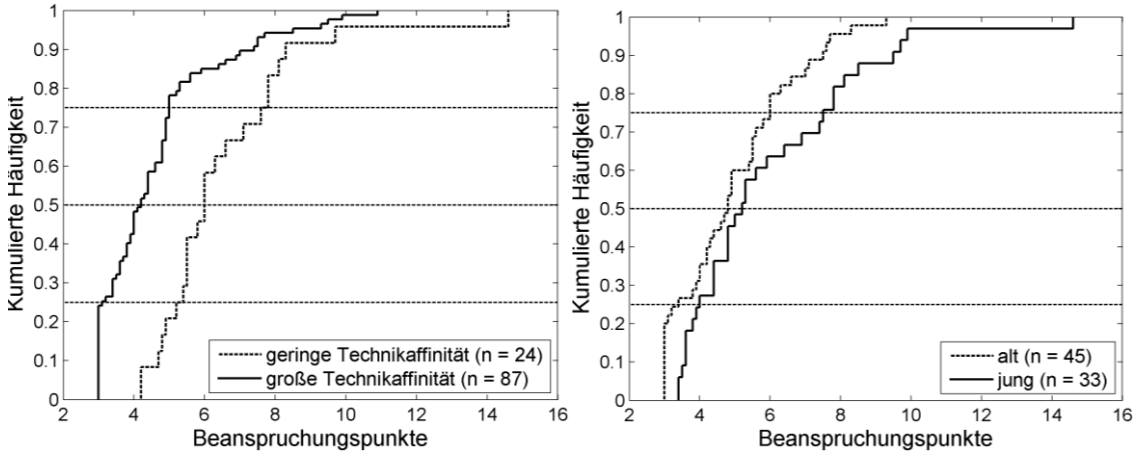


Abbildung 6-9: Beanspruchungspunkte der 37 Probanden in 3 Varianten differenziert nach Technikaffinität (links) und Alter (rechts)

Des Weiteren bewerten die Probanden mit großer jährlicher Fahrleistung ihre Beanspruchung signifikant geringer als die Probanden mit geringer jährlicher Fahrleistung, wie auch Abbildung 6-10 andeutet. So liegt der Verlauf der Probanden mit geringer Fahr-

leistung fast vollständig weiter rechts und weist so größere Beanspruchungspunkte gegenüber den Probanden mit großer Fahrleistung auf.

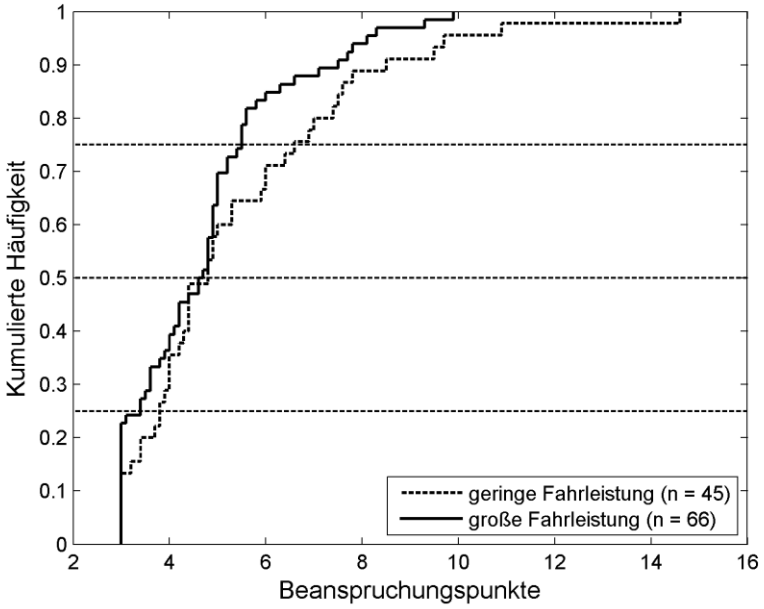


Abbildung 6-10: Beanspruchungspunkte der 37 Probanden in 3 Varianten differenziert nach jährlicher Fahrleistung

Somit lässt sich zusammenfassen: Die Beanspruchung wird von Fahrern mit viel Fahrleistung geringer eingestuft als von Fahrern mit wenig Fahrleistung; ältere Fahrer empfinden weniger Beanspruchung als junge Fahrer, technikaffine Fahrer geben an, deutlich weniger beansprucht zu sein als weniger technikaffine Fahrer. Zwischen der Beanspruchung von Männern und Frauen lässt sich kein Unterschied nachweisen.

Ältere Fahrer verfügen ähnlich wie Fahrer mit großer jährlicher Fahrleistung über mehr Erfahrung beim Führen eines Kraftfahrzeugs als junge Fahrer bzw. Fahrer mit geringer jährlicher Fahrleistung und sind aus diesem Grund vermutlich beim Fahrstreifenwechsel im Rahmen der Fahrversuche weniger beansprucht. Ursache für die geringe Beanspruchung der technikaffinen Fahrer kann neben einem besseren Verständnis für die Situation durch ein ausgeprägtes, räumliches Vorstellungsvermögen und für das Fahrzeug auch der Spaß am Fahren und an den Fahrversuchen sein.

6.5.4 Resultate Nebenaufgabenleistung

Nachfolgend werden die Änderungen in der Beanspruchung für die drei Systemvarianten für alle Probanden und für einzelne Probandengruppen bewertet. Abschließend wird die Beanspruchung der Probandengruppen während der Fahrten auf dem Versuchsgelände miteinander verglichen.

Die Nebenaufgabenleistung wurde mit Fehlerpunkten zwischen 0 und 100 bewertet. Je mehr Punkte, desto geringer die Leistung bei der Durchführung der Nebenaufgabe,

desto höher die Beanspruchung. Bei drei Runden traten technische Defekte während der Aufzeichnung auf, so dass die Daten nicht in der Auswertung berücksichtigt sind. Abbildung 6-11 zeigt die Nebenaufgabenpunkte aller 71 Runden je Variante als Boxplot ohne Whisker. Die Messungen außerhalb der mittleren Quartile sind einzeln dargestellt. Der Median für die Fahrten ohne System liegt mit 41 Punkten am höchsten, für die Fahrten mit LCDAS bei 38 und für die Runden mit FSWA bei 37 Punkten. Gemessen am Median weisen die Fahrten mit FSWA folglich die niedrigste Beanspruchung auf. Die Nullhypothese der Gleichheit lässt sich mit dem zweiseitigen Wilcoxon-Test für nicht normalverteilte, abhängige Stichproben nicht falsifizieren. Folglich wird die Beanspruchung durch LCDAS und FSWA weder reduziert, noch erhöht.

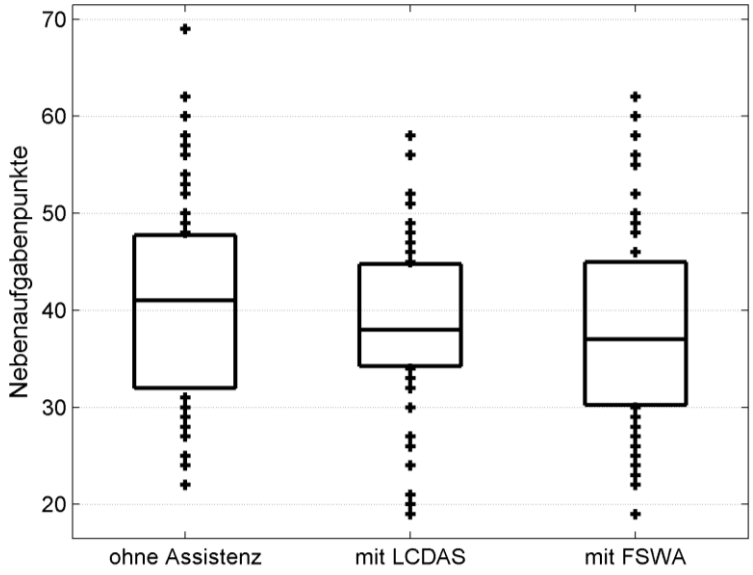


Abbildung 6-11: Nebenaufgabenpunkte aller Runden (n = 71)

Die möglichen Ursachen für das Resultat sind wie beim NASA TLX die Versuchsgestaltung, das Messverfahren und das Assistenzsystem. Allerdings wird mit dem Erfassen der Nebenaufgabenleistung im Gegensatz zum NASA TLX der subjektive Probandeneinfluss ausgeschlossen. Das Resultat der nicht falsifizierbaren Gleichheit bleibt jedoch bestehen. Die weiteren Einflüsse und die Schlussfolgerungen wurden bereits in Kapitel 6.5.3 diskutiert.

Nachfolgend werden die Fahrten mit den Assistenzsystemen im Vergleich zu den Fahrten ohne Assistenzsystem für die einzelnen Probandengruppen analysiert. Die statistische Auswertung erfolgt mit dem einseitigen t-Test für normalverteilte, abhängige Stichproben. Die vollständigen Ergebnisse befinden sich im Anhang in Tabelle 8-4.

Abbildung 6-12 zeigt die kumulierte Häufigkeit der Beanspruchungspunkte für die weiblichen und die männlichen Probanden.

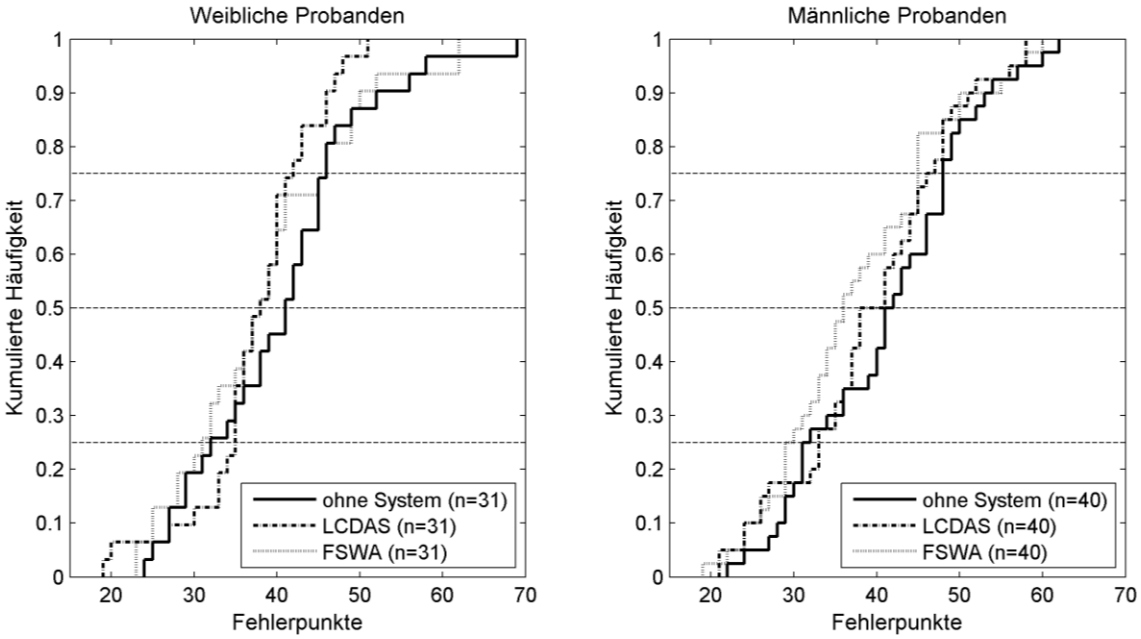


Abbildung 6-12: Kumulierte Häufigkeit der Fehlerpunkte je Systemvariante für weibliche Probanden (links) und männliche Probanden (rechts)

Die Verläufe der Fahrerinnen liegen dicht zusammen und statistische Differenzen sind nicht nachweisbar. Bei den männlichen Probanden weist der FSWA für die mittleren 50 % der Fahrten, zwischen dem unteren und oberen Quartil, die geringste Beanspruchung auf. Der entsprechende Signifikanzwert liegt mit 6,7 % knapp über dem Grenzwert für Signifikanz von 5 %.

Abbildung 6-13 zeigt die Beanspruchung differenziert nach Technikaffinität.

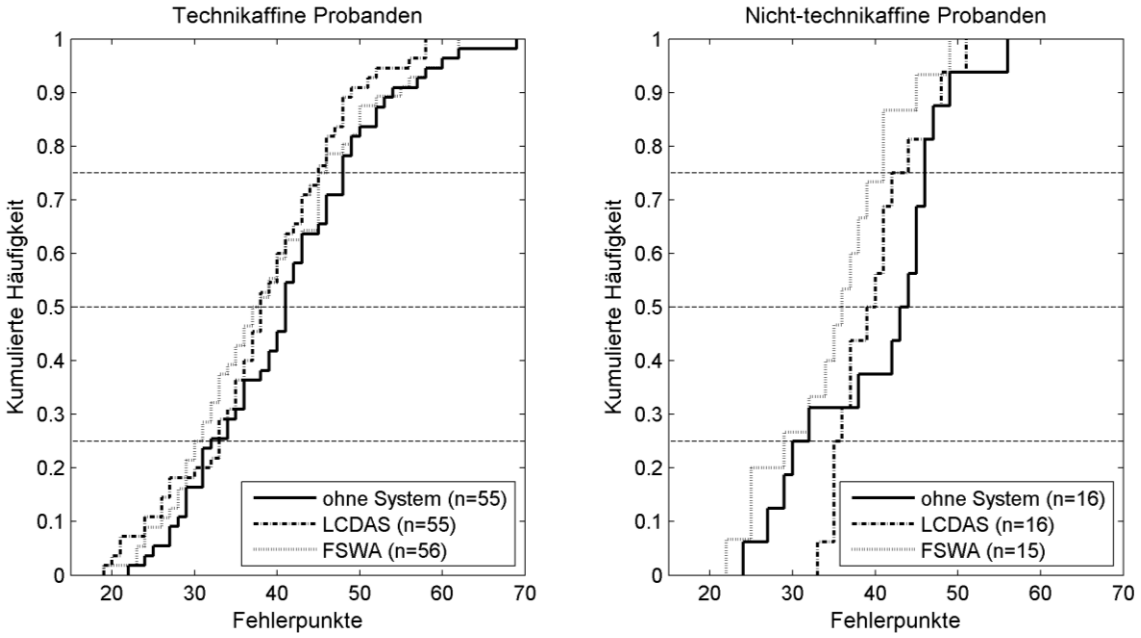


Abbildung 6-13: Kumulierte Häufigkeit der Fehlerpunkte je Systemvariante für die technikaffinen Probanden (links) und nicht-technikaffinen Probanden (rechts)

Die technikaffinen Probanden sind, wie der Abbildung zu entnehmen ist, durch die Systeme entlastet, denn die Fahrten ohne System liefern über den gesamten Verlauf größere Beanspruchungswerte. Allerdings ist dies nicht statistisch signifikant. Die kleinsten Beanspruchungswerte, unterhalb des ersten Quartils der Fahrten der nicht technikaffinen Probanden mit LCDAS sind mehr als 10 Punkte größer als die Fahrten ohne System und FSWA. Der Median für die Fahrten ohne System liegt bei 44 Punkten und ist damit 4 Punkte größer als für LCDAS und 8 Punkte größer als für FSWA, das über den gesamten Verlauf die geringsten Werte liefert. Der Signifikanzwert für die Falsifikation der Nullhypothese, dass die Beanspruchung der nicht technikaffinen Probanden mit FSWA über alle Runden größer oder gleich der Beanspruchung ohne System ist, beträgt 5,5 %. Des Weiteren ist die Streuung der Werte für die nicht technikaffinen Probanden sehr gering.

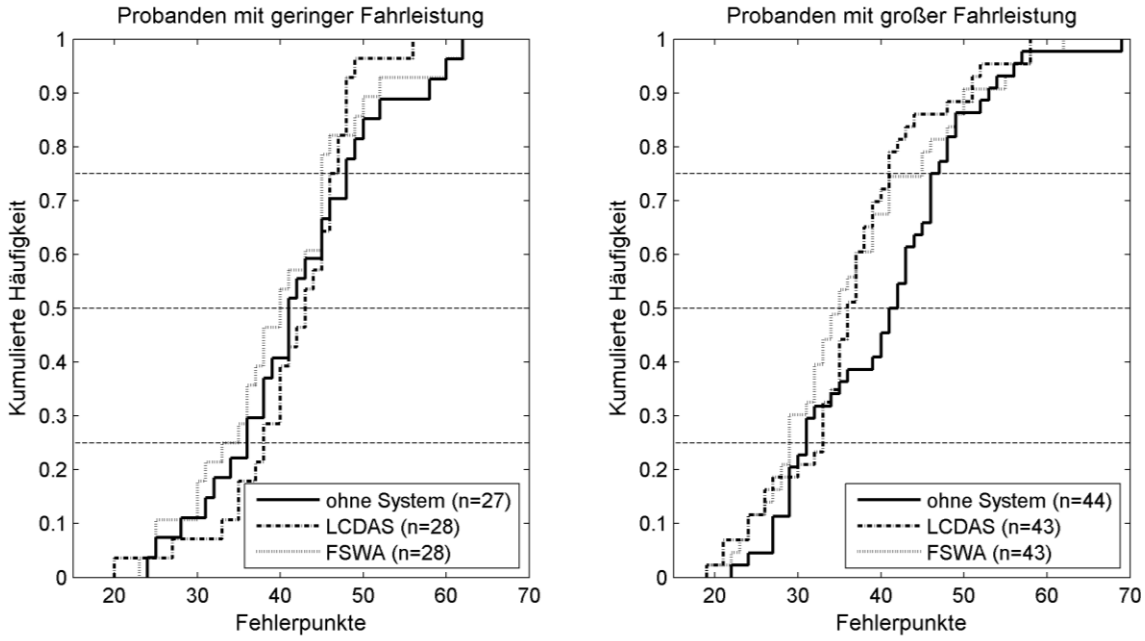


Abbildung 6-14: Kumulierte Häufigkeit der Fehlerpunkte je Systemvariante für Probanden mit geringer Fahrleistung (links) und großer Fahrleistung (rechts)

Die Beanspruchung der Probanden mit geringer Fahrleistung ist für alle Systeme nahezu gleich wie Abbildung 6-14 links zeigt. Die Beanspruchung der Probanden mit großer Fahrleistung ist statistisch signifikant kleiner bei der Fahrt mit LCDAS als ohne System. Beim Vergleich von FSWA und ohne System liegt der Signifikanzwert bei 5,9 %.

Abbildung 6-15 zeigt die Beanspruchung der jungen und alten Probandengruppen differenziert nach den drei Systemvarianten.

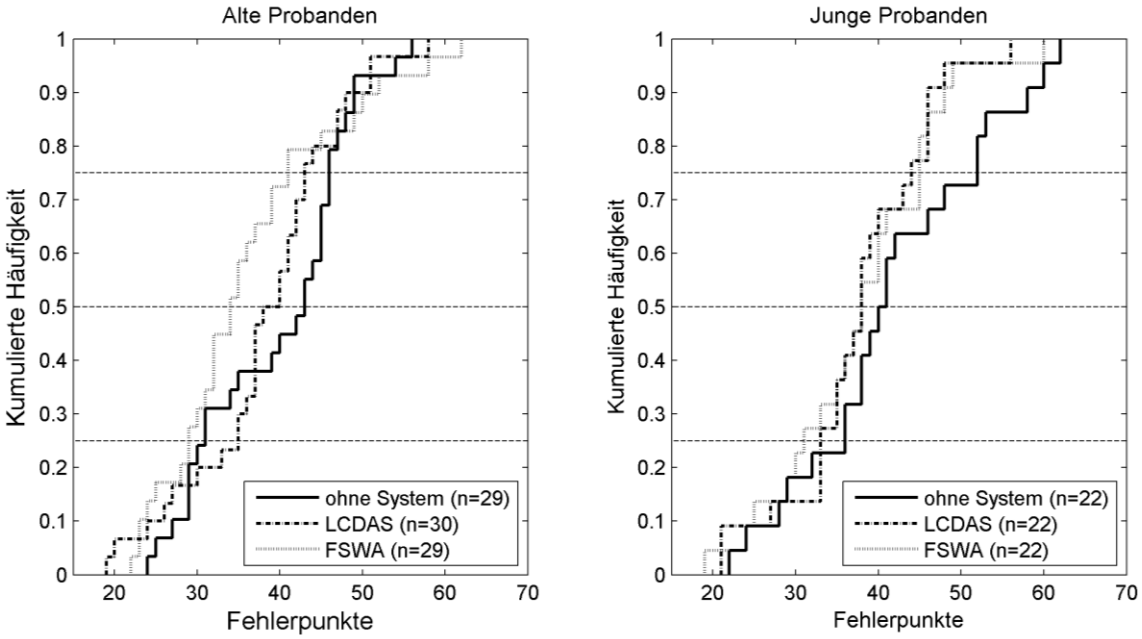


Abbildung 6-15: Kumulierte Häufigkeit der Fehlerpunkte je Systemvariante für alte Probanden (links) und junge Probanden (rechts)

Für den Vergleich von jungen und alten Probanden lassen sich keine signifikanten Unterschiede feststellen. Die alten Probanden weisen gemessen an den Medianen deutliche Unterschiede auf. So beträgt der Median der Fahrten ohne System 43, der Fahrten mit LCDAS 38 und der Fahrten mit FSWA 34 Punkte. Besonders im mittleren Bereich zwischen dem oberen und unteren Quartil zeigen die Messungen für den FSWA deutlich kleinere Ergebnisse als für die Fahrten mit LCDAS und ohne System. Bei den jungen Fahrern liegen die Graphen enger zusammen. Allerdings liegt der Graph der Beanspruchungspunkte ohne System fast über den gesamten Verlauf am weitesten rechts.

Die Analyse der einzelnen Merkmalsgruppen zeigt, dass einige Probandengruppen von den Assistenzsystemen tendenziell profitieren. So sinkt der Median für die nicht technikaffinen, die männlichen und die alten Fahrer. Obwohl die entsprechenden Signifikanzwerte sehr gering sind, sind signifikante Unterschiede nur für die Probanden mit großer Fahrleistung zwischen den Fahrten mit LCDAS und ohne System nachweisbar.

Abbildung 6-16 zeigt die Beanspruchung aller Runden in Abhängigkeit der Merkmalsausprägung.

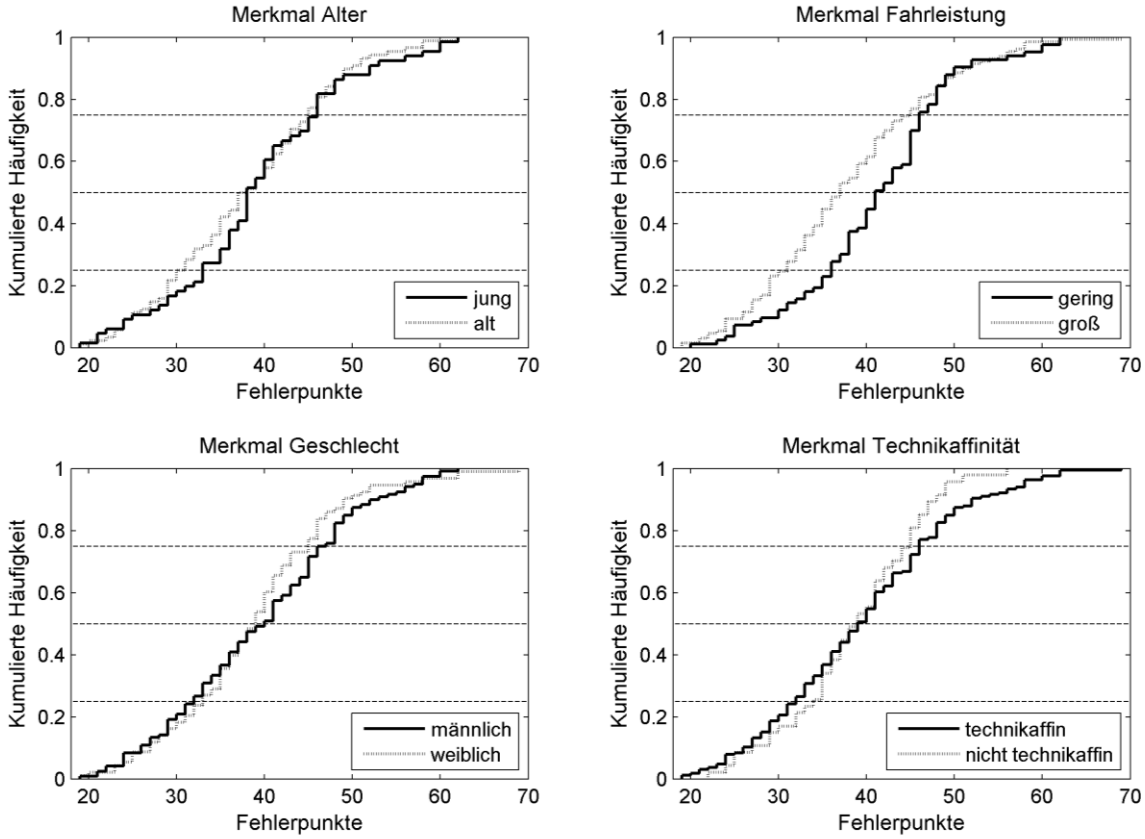


Abbildung 6-16: Vergleich der Beanspruchung aller Systeme differenziert nach Merkmalsausprägungen

Die Beanspruchung der Fahrer mit großer jährlicher Fahrleistung ist hochsignifikant geringer als die Beanspruchung der Fahrer mit geringer jährlicher Fahrleistung. Das bestätigt die Ergebnisse des NASA TLX. Für alle übrigen Merkmalsausprägungen lassen sich keine Unterschiede feststellen. Die signifikanten Unterschiede in der subjektiven Beanspruchung der technikaffinen und nicht technikaffinen Probanden werden durch das Nebenaufgabenmaß nicht bestätigt. Die geringere, subjektive Beanspruchungsbewertung des manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenzsystems der technikaffinen Probanden wird vermutlich durch ihre Begeisterungsfähigkeit für technische Produkte beeinflusst, denn das objektive Testverfahren bestätigt dieses Empfinden, wie Abbildung 6-16 zeigt, nicht.

6.5.5 Fazit Beanspruchungsmessung

Tabelle 6-5 zeigt eine Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Versuchen zur Beanspruchungserfassung. Während ein waagerechter Pfeil einen nicht statistisch nachweisbaren Unterschied symbolisiert, zeigt ein nach oben oder unten gerichteter Pfeil einen signifikanten Unterschied des Vergleichs bzw. ein Pfeil in Klammern einen nahezu signifikanten Unterschied. Dies entspricht einem Signifikanzniveau kleiner 8,5 %.

Tabelle 6-5: Signifikante Beanspruchungsunterschiede der Messverfahren Task Load Index (TLX) und Nebenaufgabenleistung (NA)

		ohne System → LCDAS		**ohne System → FSWA**	
		TLX	NA	TLX	NA
Gesamtes Kollektiv		→	→	→	→
Geschlecht	männlich	→	→	→	(↘)
	weiblich	→	→	→	→
Alter	jung	→	→	→	→
	alt	→	→	→	(↘)
Fahrleistung	gering	→	→	→	→
	groß	→	↘	→	(↘)
Technikaffinität	technikaffin	→	(↘)	→	→
	nicht technikaffin	→	→	→	(↘)

Mit dem NASA TLX lassen sich keine Beanspruchungsunterschiede zwischen den Fahrten ohne System, mit LCDAS und mit manöverbasiertem Fahrstreifenwechselassistenten nachweisen. Dies wird vorrangig auf den prototypischen, subjektiven Eindruck der Probanden sowie die kurze Kennenlernphase zurückgeführt. Dies wird durch die positive Tendenz zur Beanspruchungsreduktion des LCDAS, die auf statistischen Kennwerten wie dem Mittelwert beruht, gestützt, da dieses System viel weniger Informationen enthält, für den Fahrer somit einfacher zu verstehen ist und so vermutlich einer kürzeren Lernphase bedarf. Um den subjektiven Eindruck auszuschließen, wurde die Nebenaufgabenleistung erfasst. Für das gesamte Probandenkollektiv lassen sich auch mit diesen Verfahren keine signifikanten Reduktionen der Beanspruchung durch die Assistenzsysteme nachweisen. Allerdings wird die Beanspruchung der Fahrer mit großer Fahrleistung signifikant und der technikaffinen Probanden nahezu signifikant ($\alpha<10\%$) durch das LCDAS reduziert. Der manöverbasierte Fahrstreifenwechselassistent reduziert die Beanspruchung bei der Messung der Nebenaufgabe nahezu signifikant für die männlichen, die älteren, die nicht technikaffinen Probanden und für die Probanden mit großer Fahrleistung. Somit reduziert der FSWA bei vier Probandengruppen die Beanspruchung nahezu signifikant und der LCDAS bei jeweils einer Probandengruppe signifikant und nahezu signifikant. Das Ergebnis bestärkt die Vermutung, dass der subjektive Eindruck das Ergebnis des TLX beeinflusst. Eine eindeutige Rangfolge der Systeme lässt sich nicht festlegen. Die Probanden mit großer Fahrleistung profitieren von beiden Systemen am stärksten.

Alle hier dargestellten Resultate sind nur unter den getroffenen Randbedingungen, z.B. Szenario auf Testgelände, etc., gültig. Eine Schlussfolgerung über die allgemeine Beanspruchung der einzelnen Probandengruppen bei Fahrstreifenwechselmanövern ist nicht zulässig.

6.6 Sicherheitsbewertung

Die Sicherheit wird durch ein Kritikalitätsmaß beschrieben, das die verfügbare Reaktionszeit eines Fahrzeugführers in Relation zu einem vorausfahrenden Fahrzeug repräsentiert. Die Bewertung des Fahrstreifenwechselmanövers erfolgt über einen definierten Zeitraum. Nachfolgend sind das Kriterium sowie der Zeitraum definiert und die Resultate aus den Probandenversuchen sind dargestellt.

6.6.1 Kritikalitätsmaß

Zur Beurteilung der Sicherheit eines Fahrstreifenwechselmanövers ist ein Kriterium erforderlich, das eine Vergleichbarkeit in mehreren Stufen oder durch ein kontinuierliches Maß gewährleistet.

Zur Beschreibung der Fahrsituation zweier, einander folgender Fahrzeuge werden häufig drei Größen verwendet. Dies sind die Zeit bis zur Kollision TTC, die Zeitlücke τ und die zur Kollisionsvermeidung erforderliche Verzögerung D_{req}. Die Zeit bis zur Kollision und die erforderliche Verzögerung sind kongruent in ihren Parametern und der Situationsbeschreibung und können ineinander überführt werden. Vogel[187] und Fastenmeier[188] kommen übereinstimmend zu dem Schluss, dass weder die Zeitlücke noch die Zeit bis zur Kollision allein die Gefahrensituation ausreichend beschreiben, da ihre Eignung, wie in Kapitel 5.3.3 bereits beschrieben, von der Situation abhängig ist. Eine interpretierbare, leicht verständliche Kombination aller drei Größen ist bislang nicht bekannt. Anhand einer ausgewählten Situation wird das Kriterium der verfügbaren Reaktionszeit eingeführt und definiert. Dieses Kriterium vereint die bekannten, sicherheitsbeschreibenden Parameter, ist leicht verständlich und wird zur Evaluation des Sicherheitsgewinns des manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenten angewendet.

[187] Vogel: Comparison of headway time and time to collision, 2003, S. 433

[188] Fastenmeier et al.: Spurwechselanalyse, 2001, S. 23

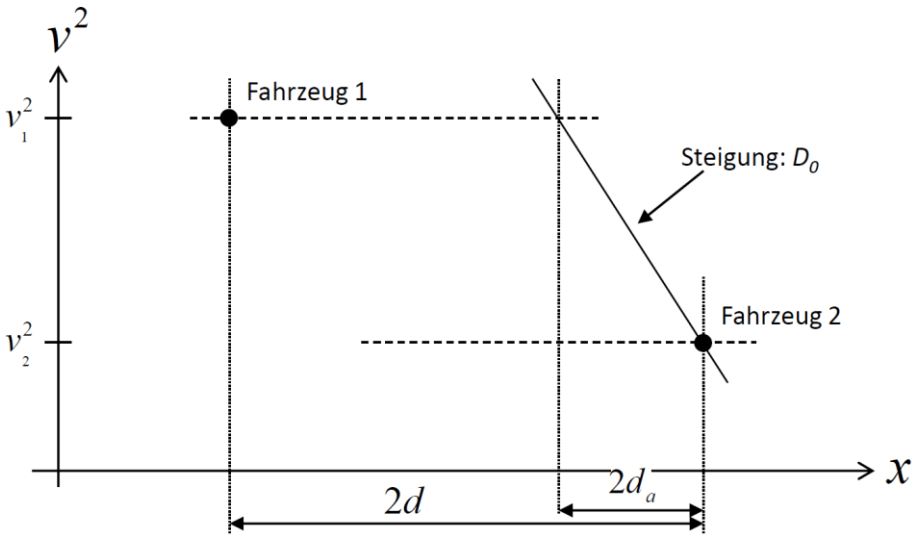


Abbildung 6-17: Situationsbewertung zweier, einander folgender Fahrzeuge

Abbildung 6-17 zeigt die Situation eines mit der Geschwindigkeit v_2 vorausfahrenden Fahrzeugs 2 und einem schnelleren, nachfolgenden Fahrzeug 1 mit Geschwindigkeit v_1. Durch die Darstellung des Quadrats der Geschwindigkeit v^2 über der Distanz x werden gleichmäßig beschleunigte Bewegungen als Geraden mit der Beschleunigung als Steigung abgebildet. Ist der Aktionsabstand d_a durch die maximale Verzögerung D_0 nach Gleichung 6.3 definiert, bleibt dem Fahrer von Fahrzeug 1 der folgende Reaktionsabstand

$$d_{react} = d - d_a \tag{6.2}$$

mit

$$d_a = \frac{v_{rel}^2}{2D_0} \tag{6.3}$$

.

Unter der Annahme, dass sich das vorausfahrende Fahrzeug gleichförmig bewegt $(a_2 = 0)$, lässt sich die verfügbare Reaktionszeit zu

$$\tau_{react,rel} = \frac{d - d_a}{v_{rel}} = \frac{d - \frac{v_{rel}^2}{2D_0}}{v_{rel}} = TTC - \frac{v_{rel}}{2D_0} \tag{6.4}$$

berechnen.

Die maximal verfügbare Reaktionszeit ergibt sich zu

$$\tau_{react,rel,\max} = TTC - \frac{v_{rel}}{2D_{0,\max}} \tag{6.5}$$

Gleichung 6.5 besitzt die identischen Nachteile wie die TTC. So liegt bei sehr kleinen Relativgeschwindigkeiten ein sehr großer Prädiktionszeitraum vor; der Abstand hat keinen Einfluss und die Prädiktion ist entsprechend ungenau und die verfügbare Reaktionszeit nach Formel 6.5 repräsentiert in einer solchen Situation nicht die Sicherheit des Szenarios.

Aus diesem Grund wird zur Sicherheitsbewertung ein alternativer Ansatz verwendet. Es wird angenommen, dass das nachfolgende Fahrzeug an der Position des vorausfahrenden Fahrzeugs dessen Geschwindigkeit erreicht hat und im Anschluss den Geschwindigkeitsverlauf des vorausfahrenden Fahrzeugs kopieren kann. Die verfügbare Reaktionszeit berechnet sich unter Vernachlässigung der vorliegenden Beschleunigungen entsprechend der nachfolgenden Gleichung zu

$$\tau_{react} = \frac{d - d_a}{v_1} = \frac{d - v_{rel}^2 / 2D_0}{v_1} = \tau - \frac{v_{rel}^2}{2D_0 v_1} \tag{6.6}$$

$$\tau_{react,\max} = \frac{d - v_{rel}^2 / 2D_{0,\min}}{v_1} \tag{6.7}$$

Der einzige zu definierende Parameter in Gleichung 6.7 ist die maximale Verzögerung $D_{0,\min}$, die für die weiteren Analysen vereinfachend auf einen konstanten Wert von 10 m/s² festgelegt wird.

6.6.2 Auswertungszeitraum

Die Sicherheitsbewertung erfolgt über die Zeitdauer des Fahrstreifenwechsels. Als Beginn für alle drei relevanten Fahrzeuge wird die Wechseleinleitung festgelegt. Diese wird anhand einer Schwellwertüberschreitung des Lenkradwinkels von 4° detektiert. Andere Größen wie z.B. die Querbeschleunigung oder die Gierrate sind erst nach einem zeitlichen Versatz messbar. Zwar dringt das betrachtete Fahrzeug erst beim Überfahren der Mittellinie in den Fahrschlauch des nachfolgenden Fahrzeugs auf dem Zielfahrstreifen ein, aber die trainierten Versuchsfahrer der umgebenden Fahrzeuge reagieren schon auf die erste, vom Menschen wahrnehmbare Wechseleinleitung, um die Situation zu entschärfen und größtmögliche Sicherheit für alle Beteiligten zu gewährleisten. Folglich würde ein Auswertungsbeginn beim Überfahren der Mittellinie nicht die Gefahr der Situation abbilden. Sobald das Fahrzeug den Startfahrstreifen verlassen hat und damit nicht mehr dem vorausfahrenden Fahrzeug folgt, endet der Bewertungszeitraum für das Fahrzeug auf dem Startfahrstreifen. Dieser Zeitpunkt wird anhand des Nulldurchgangs des Lenkradwinkels angenähert, da keine Messdaten über die Fahrstreifenrandmarkierung, die teilweise mit Markierungsnägeln dargestellt wurde, zur Verfügung stehen. Um den Annäherungsvorgang beider Fahrzeuge auf dem Zielfahrstreifen zu berücksichtigen, endet der Bewertungszeitraum mit dem Ausrichten auf dem Zielfahrstreifen und damit mit einem Lenkradwinkel von +/- 1°.

6.6.3 Resultate Sicherheitsbewertung

Die Bewertung der Sicherheit erfolgt anhand der Formel 6.7 für die verfügbare Reaktionszeit. Je mehr Reaktionszeit dem Fahrer zur Verfügung steht, desto sicherer ist die Situation. Die Ergebnisdarstellung erfolgt zur Wahrung der Übersichtlichkeit getrennt nach den Fahrzeugen I, II und III, die entsprechend Abbildung 6-18 benannt sind. Wechselt ein Proband in die Lücke vor das erste der insgesamt drei Fahrzeuge auf dem Zielfahrstreifen, ist eine Sicherheitsbetrachtung zu Fahrzeug I nicht möglich, da dieses nur virtuell im Modell vorliegt. In der Realität könnten sich noch mehr Fahrzeuge auf dem Zielfahrstreifen befinden. Entsprechend wird bei Wechseln in die Lücke hinter das letzte der drei Fahrzeug auf dem Zielfahrstreifen keine Sicherheitsbewertung von Fahrzeug II durchgeführt.

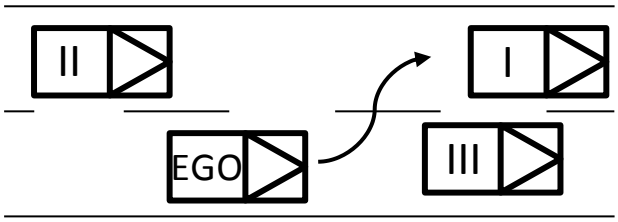


Abbildung 6-18: Bezeichnung der sicherheitsrelevanten Fahrzeuge

Die nachfolgend betrachteten Verteilungen sind, wie der Chi-Quadrat-Test zeigt, nicht normalverteilt. Aus diesem Grund erfolgt die statistische Auswertung mit dem zweiseitigen Wilcoxon-Rangsummentest mit der Nullhypothese, dass die betrachteten Verteilungen gleich sind.

Zunächst erfolgt der Vergleich der drei Systemvarianten für alle Fahrten. Da jeder Proband vier Fahrten mit jeder Systemvariante durchführte, stehen pro Systemvariante maximal 148 Messungen zur Verfügung.

Abbildung 6-19 zeigt die kumulierte Häufigkeit der verfügbaren Reaktionszeit für Fahrzeug I, welches das vorausfahrende Fahrzeug auf dem Zielfahrstreifen darstellt. Je weiter rechts die Verläufe in der Darstellung liegen, desto größer ist die verfügbare Reaktionszeit und desto sicherer ist die Systemvariante. Der Verlauf des manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenten liegt bei deutlich größeren Reaktionszeiten. Der Unterschied zu den beiden weiteren Systemvarianten ist dementsprechend statistisch höchstsignifikant. Obwohl der Median der Fahrten ohne System und mit LCDAS identisch ist, ist der Unterschied zwischen den beiden Varianten hochsignifikant. Somit erhöht LCDAS die Sicherheit bezüglich Fahrzeug I und FSWA erhöht die Sicherheit im Vergleich zu LCDAS noch einmal.

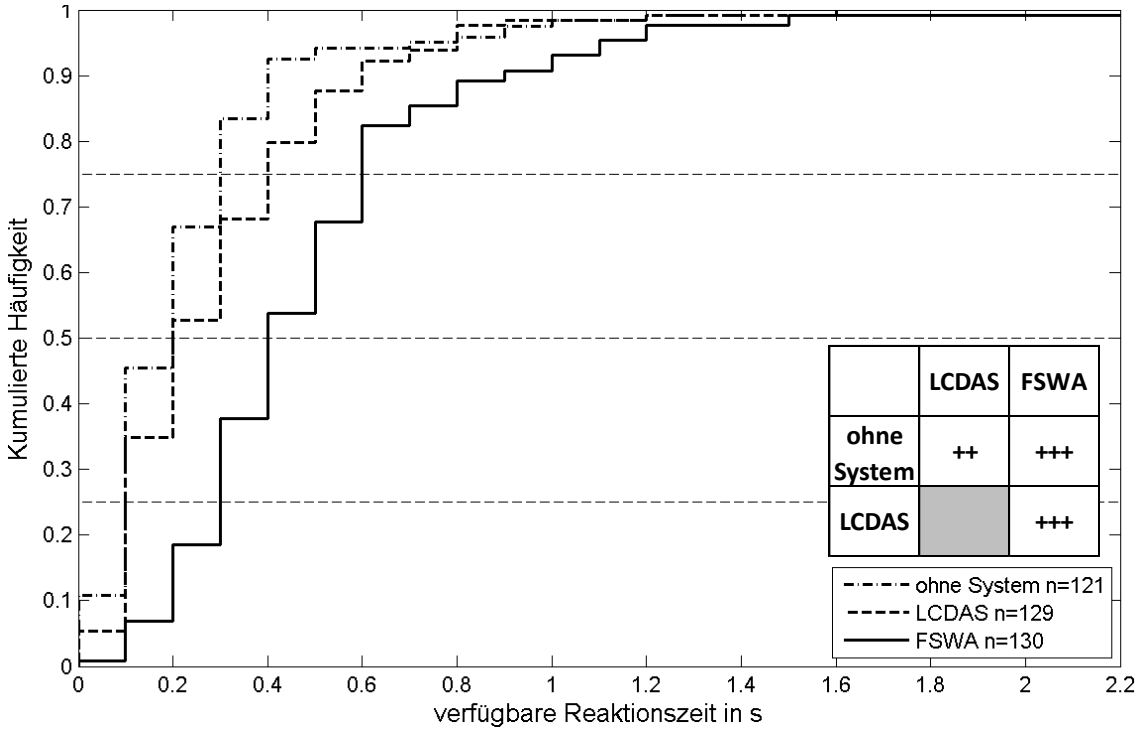


Abbildung 6-19: Kumulative Häufigkeitsverteilung der verfügbaren, minimalen Reaktionszeit für Fahrzeug I (+ → signifikant, ++ → hoch signifikant, +++ → höchst signifikant)

Abbildung 6-20 zeigt die verfügbare Reaktionszeit für das nachfolgende Fahrzeug auf dem Zielfahrstreifen, das mit II nummeriert ist.

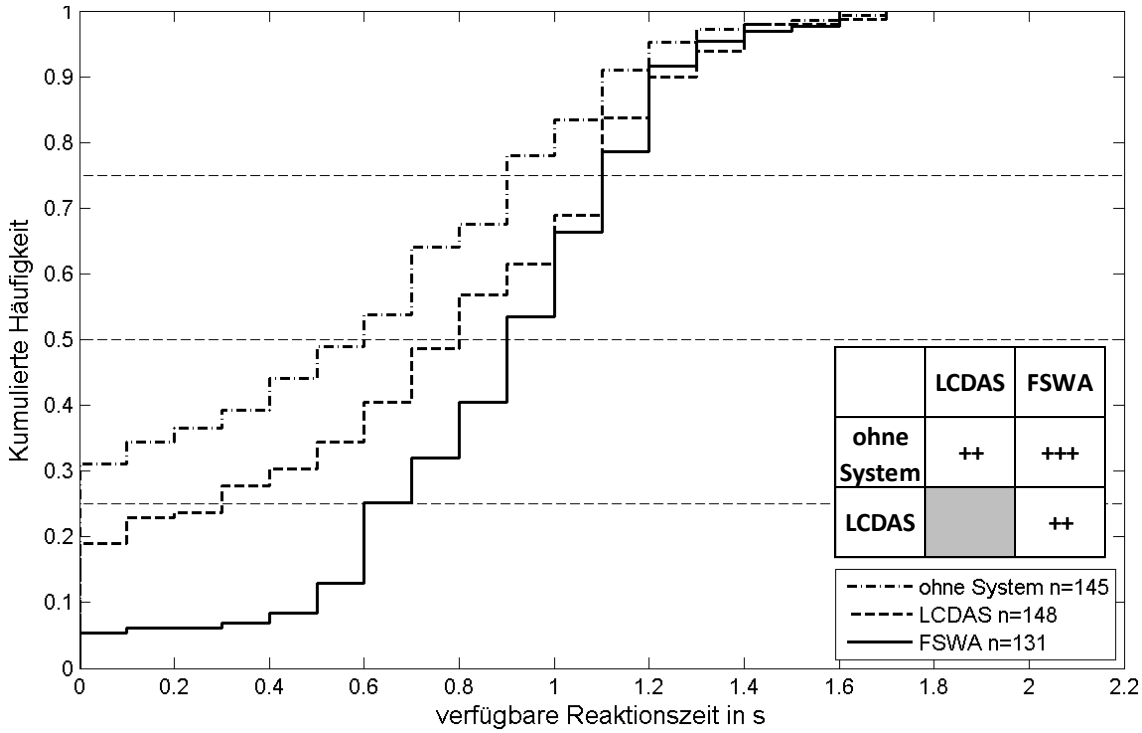


Abbildung 6-20: Kumulative Häufigkeitsverteilung der verfügbaren, minimalen Reaktionszeit für Fahrzeug II (+ → signifikant, ++ → hoch signifikant, +++ → höchst signifikant)

Im Vergleich zu Fahrzeug I ist der Median aller drei Systemvarianten größer. Aber die Häufigkeit der Fahrstreifenwechsel mit einer verfügbaren Reaktionszeit von Null liegt deutlich höher. So sind dies für die Fahrten ohne System mehr als 30 %. Diese geringen und damit gefährlichen Werte werden zu Beginn des Auswertungszeitraums erreicht. Folglich war bei bis zu 30 % der Fahrten die verfügbare Reaktionszeit bei der Wechseleinleitung aufgebraucht. Dennoch sind keine Kollisionen bei den Versuchsfahrten aufgetreten, da ein Wechsel auf den benachbarten Fahrstreifen Zeit in Anspruch nimmt und sich die Situation bis zu diesem Zeitpunkt bereits entschärft hatte.

Der Median liegt für die Fahrten ohne System bei 0,6 s, für die Fahrten mit LCDAS bei 0,8 s und für die Fahrten mit FSWA bei 0,9 s. Die Steigerung der Sicherheit lässt sich statistisch hochsignifikant beziehungsweise höchstsignifikant nachweisen. Somit wird die Rangordnung der Sicherheitsbeurteilung für Fahrzeug I bestätigt: Bei den Versuchsfahrten war das FSWA sicherer als das LCDAS, das wiederum sicherer als ohne System bezüglich des nachfolgenden Fahrzeugs auf dem Zielfahrstreifen abschnitt.

In Abbildung 6-21 ist die verfügbare Reaktionszeit für alle drei Systemvarianten bezüglich des vorausfahrenden Fahrzeugs auf dem Startfahrstreifen (Fahrzeug III) dargestellt.

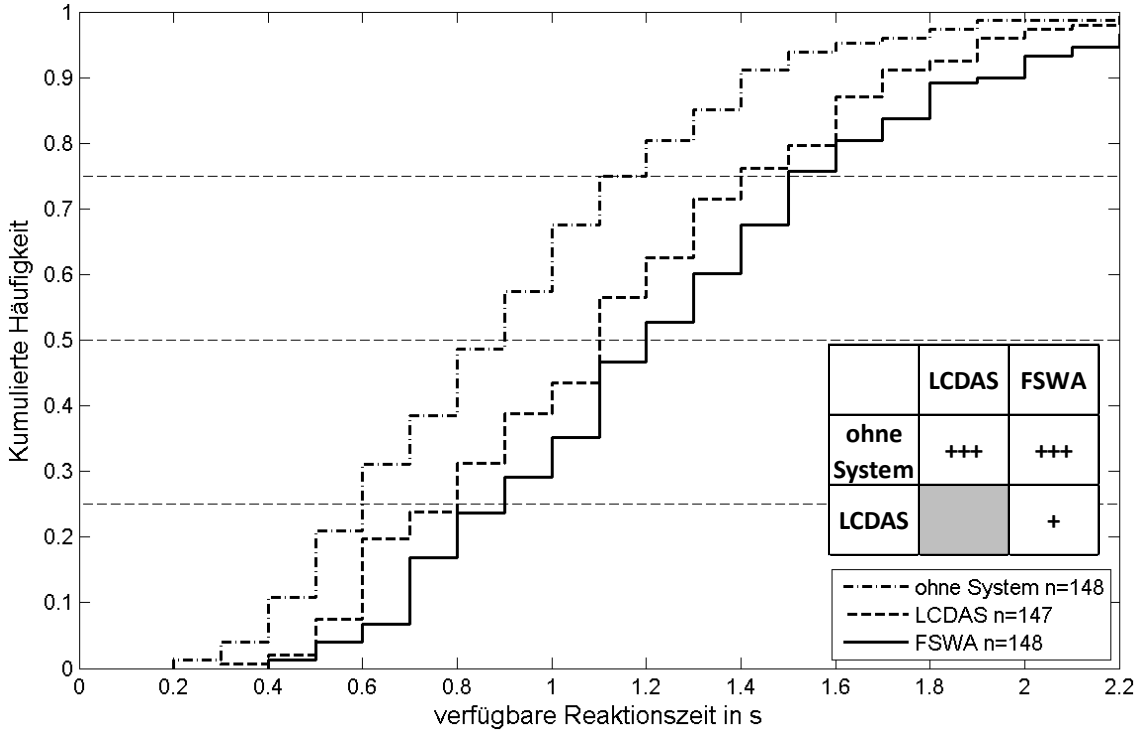


Abbildung 6-21: Kumulative Häufigkeitsverteilung der verfügbaren, minimalen Reaktionszeit für Fahrzeug III (+ → signifikant, ++ → hoch signifikant, +++ → höchst signifikant)

Zum vorausfahrenden Fahrzeug III auf dem Startfahrstreifen ist die kleinste gemessene Reaktionszeit 0,2 s. Die Mediane liegen bei 0,9 s für die Fahrten ohne System sowie bei 1,1 s und 1,2 s für LCDAS und FSWA. LCDAS erhöht die Sicherheit der Versuchsfahrten im Vergleich zu Fahrten ohne System höchstsignifikant. FSWA wiederum verbessert die Sicherheit gegenüber dem LCDAS signifikant.

Somit ist die Rangfolge der drei Systemvarianten für alle drei Fahrzeuge bei den Versuchsfahrten identisch. Der manöverbasierte Fahrstreifenwechselassistent bietet die höchste Sicherheit und das Lane Change Decision Aid System erhöht die Sicherheit gegenüber den Fahrten ohne System.

Nachfolgend wird die Sicherheit der Systemvarianten für einzelne Probandengruppen analysiert, um einen Vergleich zu der Analyse der Beanspruchungsbewertung zu ermöglichen.

Tabelle 6-6 zeigt die statistisch signifikanten Änderungen der Sicherheit für LCDAS und FSWA im Vergleich zu den Fahrten ohne System. Ein waagerechter Pfeil symbolisiert keine signifikante Unterscheidung und bei einem Pfeil nach oben oder nach unten ist eine entsprechende Differenz statistisch signifikant nachweisbar. Für die beiden Vergleiche sind die Ergebnisse für jedes Fahrzeug separat aufgelistet. Tabelle 8-5 im Anhang enthält alle Signifikanzwerte. Der manöverbasierte Fahrstreifenwechselassistent verbessert die Sicherheit unabhängig vom betrachteten Fahrzeug und für sämtliche betrachtete Probandengruppen signifikant. Das LCDAS dagegen erhöht die Sicherheit für alle betroffenen Fahrzeuge nur für die alten Probanden und die Probanden mit großer Fahrleistung. Für die Gruppe der jungen Fahrer ist durch das LCDAS kein Sicherheitsgewinn feststellbar und für alle weiteren Probandengruppen ist keine eindeutige Aussage möglich, da der Sicherheitsgewinn vom betrachteten Fahrzeug abhängig ist.

Tabelle 6-6: Statistisch signifikante Sicherheitsänderungen durch LCDAS und FSWA

		ohne System → LCDAS			**ohne System → FSWA**		
		Fzg I	Fzg II	Fzg III	Fzg I	Fzg II	Fzg III
gesamtes Kollektiv		↗	↗	↗	↗	↗	↗
Geschlecht	männlich	↗	→	↗	↗	↗	↗
	weiblich	→	↗	↗	↗	↗	↗
Alter	jung	→	→	→	↗	↗	↗
	alt	↗	↗	↗	↗	↗	↗
Fahrleistung	gering	→	→	↗	↗	↗	↗
	groß	↗	↗	↗	↗	↗	↗
Technikaffinität	technikaffin	↗	→	↗	↗	↗	↗
	nicht technikaffin	→	↗	→	↗	↗	↗

Abschließend wird die Sicherheit während der Fahrstreifenwechsel zwischen den einzelnen Probandengruppen unabhängig von der Systemvariante analysiert.

Stellvertretend für die Ergebnisse zeigt Abbildung 6-22 die kumulierte Häufigkeit der Reaktionszeit differenziert nach den Merkmalsgruppen junge und alte Probanden. Von links nach rechts sind die Messwerte der Fahrzeuge I bis III angeordnet. Für Fahrzeug I liegen die Verläufe sehr dicht zusammen. Lediglich oberhalb des oberen Quartils erzielen die jungen Probanden größere verfügbare Reaktionszeiten als die älteren Probanden. Dementsprechend lässt sich ein Unterschied nicht nachweisen. Für Fahrzeug II und III liegen die Verläufe der alten Probanden weiter rechts bei größeren, verfügbaren Reaktionszeiten. Somit sind sie bei den Fahrversuchen sicherer gefahren. Dies ist auch statistisch signifikant nachweisbar. Diese Ergebnisse bestätigen zahlreiche Untersuchungen[189], nach denen junge Fahrer eine größere Risikobereitschaft besitzen als ältere Fahrer.

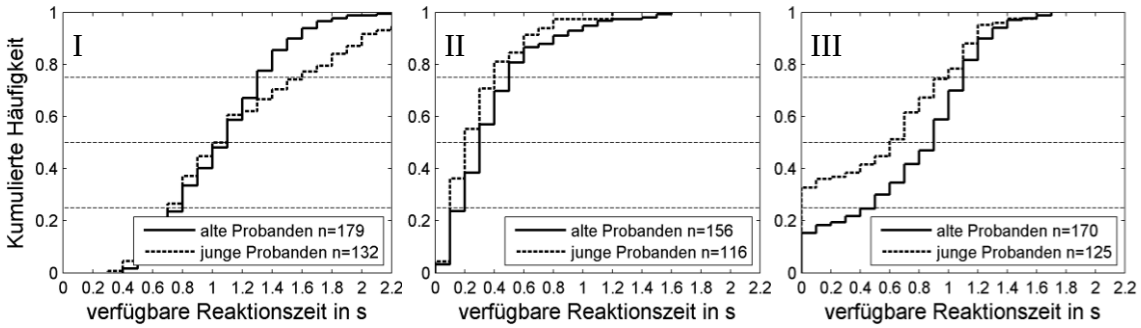


Abbildung 6-22: Verfügbare Reaktionszeit in Relation zu den Fahrzeuge I bis III (von links nach rechts) differenziert nach den Gruppen junge und alte Probanden

Für sämtliche Gruppen sind die statistischen Ergebnisse in Tabelle 6-7 zusammengestellt.

Tabelle 6-7: Signifikante Sicherheitsunterschiede der Probandenversuche

männlich → weiblich			**technikaffin → nicht technikaffin**			**alt → jung**			**große → geringe Fahrleistung**		
Fzg I	Fzg II	Fzg III	Fzg I	Fzg II	Fzg III	Fzg I	Fzg II	Fzg III	Fzg I	Fzg II	Fzg III
↗	→	→	→	→	↗	↘	↘	→	↗	→	→

Wie die Tabelle zeigt, sind nur für einzelne Fahrzeuge Unterschiede zwischen den Gruppen nachweisbar. So fahren die Frauen bzw. Fahrer mit geringer Fahrleistung in Bezug auf das vorausfahrende Fahrzeug I auf dem Zielfahrstreifen sicherer als die Männer bzw. Fahrer mit großer Fahrleistung und nicht technikaffine Probanden. Die nicht technikaffinen Fahrer fahren sicherer in Bezug zu Fahrzeug III als technikaffine Fahrer. Rückschlüsse auf sicherheitsrelevante Unterschiede beim Fahrstreifenwechsel der Probandengruppen sind nicht möglich.

[189] z.B. Fastenmeier et al.: Zuverlässigkeit jüngerer und älterer Autofahrer, 2005, S. 116

6.6.4 Sensitivitätsanalyse des Kritikalitätsmaßes

Zur Sicherheitsbewertung wurde die verfügbare Reaktionszeit als Kritikalitätsmaß entwickelt. Dieses Maß verwendet lediglich die maximale Verzögerung D_0 als einzigen zu definierenden Parameter. Sie wurde für die Auswertung und Ergebnisdiskussion auf 10 m/s² festgelegt. Eine Definition von 8 m/s² verändert die Signifikanzwerte der statistischen Tests leicht, hat aber keinerlei Einfluss auf die Gesamtaussage. Sämtliche nachgewiesenen, statistisch signifikanten Unterschiede bleiben bestehen. Neue statistisch signifikante Unterschiede treten nicht auf. Tabelle 8-6 im Anhang zeigt die Signifikanzwerte der Vergleiche von LCDAS und FSWA mit der Baseline für alle Probandengruppen mit dem variierten Parameter D_0.

6.6.5 Fazit Sicherheitsbewertung

Die Auswertung des gesamten Probandenkollektivs zeigt in Bezug zu allen beteiligten Fahrzeugen einen mindestens hochsignifikanten Sicherheitsgewinn gemessen an der verfügbaren Reaktionszeit durch das LCDAS und einen höchstsignifikanten Sicherheitsgewinn durch den manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenten. Der FSWA ist mindestens signifikant sicherer als das LCDAS. Bei der Auswertung einzelner Probandengruppen erhöht der manöverbasierte Fahrstreifenwechselassistent die Sicherheit für alle Gruppen und in Relation zu allen Fahrzeugen. Ein Sicherheitsgewinn durch den LCDAS lässt sich nur für einen Teil der Probandengruppen nachweisen.

Signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Probandengruppen für die Summe der bewerteten Fahrstreifenwechsel lassen sich nur für einzelne der drei beteiligten Fahrzeuge nachweisen.

Eine Sensitivitätsanalyse des Parameters D_0 des Sicherheitskriteriums zeigt, dass eine Variation von 10 m/s² auf 8 m/s² keinen Einfluss auf die Gesamtaussage hat.

6.7 Vergleich Sicherheit und Fahrerbeanspruchung

Laut Schneider[190] sollen Fahrerassistenzsysteme die Sicherheit durch Reduktion der Beanspruchung erhöhen. Als eine der wichtigsten Maßnahmen nennt er ein optimiertes Verständnis der Verkehrssituation. Auch Winner[191] nennt die präventive Assistenz als Maßnahme zur Reduktion der latenten Gefahr. Eine Möglichkeit zur präventiven Assistenz ist die Reduktion der Beanspruchung. Somit besteht ein Zusammenhang zwischen

[190] Schneider: Modellierung und Erkennung von Fahrsituationen und Fahrmanövern, 2009

[191] Winner: Frontalkollisionsschutzsysteme, 2009, S. 522

Fahrerbeanspruchung und Sicherheit: durch Reduktion der Fahrerbeanspruchung und Freigabe von Ressourcen wird die Sicherheit erhöht. Die Unterforderung des Fahrers kann diesen Effekt allerdings umkehren.

Tabelle 6-8 zeigt die Vergleiche der Fahrten mit LCDAS und FSWA gegenüber den Fahrten ohne System. Dargestellt sind die Ergebnisse der Beanspruchungserfassungsmethoden NASA TLX und Nebenaufgabenleistung sowie der Sicherheitsbewertung mittels verfügbarer Reaktionszeit für die einzelnen Gruppen.

Tabelle 6-8: Signifikante Unterschiede in Beanspruchung (TLX, NA) und Sicherheit (verfügbare Reaktionszeit τ_{react})

		Geschlecht						**Alter**						**Fahrleistung**						**Technikaffinität**					
		männlich			weiblich			jung			alt			gering			groß			affin			nicht affin		
LCDAS	TLX	→			→			→			→			→			→			→			→		
	NA	→			→			→			→			→			↘			(↘)			→		
	τ_{react}	↗	→	↗	→	↗	↗	→	→	→	↗	↗	↗	→	→	↗	↗	↗	↗	↗	→	→	→	↗	→
FSWA	TLX	→			→			→			→			→			→			→			→		
	NA	(↘)			→			→			(↘)			→			(↘)			→			(↘)		
	τ_{react}	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗

Die Sicherheit wurde durch FSWA für alle Probandengruppen und für das gesamte Kollektiv erhöht. LCDAS erreichte für das gesamte Kollektiv und für einzelne Probandengruppen eine Sicherheitserhöhung. Die Beanspruchung wurde laut dem subjektiven NASA TLX weder reduziert noch erhöht und laut der Nebenaufgabe wurde sie für einzelne Probandengruppen reduziert. Damit lässt sich eine Korrelation von Beanspruchung und Sicherheit für die durchgeführten Fahrversuche nicht eindeutig nachweisen. Das Ergebnis mit der fehlenden Beanspruchungsreduktion für die Mehrzahl der Probandengruppen wird, wie bereits ausführlich erläutert, auf den prototypischen Entwicklungsstand sowie die kurze Kennenlernphase zurückgeführt.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Der Fahrstreifenwechsel ist ein sehr beanspruchendes Manöver. Dies zeigt sich in der Verkehrsunfallstatistik und in Fahrerbefragungen und wird durch die vielen, teilweise parallel ablaufenden Aufgaben des Fahrers, wie z.B. Überwachung des seitlichen und vorausliegenden Fahrstreifens, Bewerten der Lücken auf dem Zielfahrstreifen, Anpassung der Längsdynamik und Wechseln des Fahrstreifens, verursacht. Für einzelne Handlungen sind bereits Unterstützungssysteme wie ACC und LCDAS oder eine automatisierte Trajektorienplanung entwickelt. Allerdings ist bislang kein System bekannt, das dem Fahrer über einen längeren Zeitraum, der sich von der Intentionsbildung bis zur Wechseldurchführung erstreckt und eine Einzelhandlungen verknüpfende Manöverassistenz sowohl auf der Perzeptions- als auch auf der Kognitionsebene bietet, ohne die Fahrzeugführung zu automatisieren.

Aus diesem Grund ist das Ziel der vorliegenden Arbeit, den Ansatz eines manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenten zu konzeptionieren und für eine Evaluation prototypisch umzusetzen.

Die vom Fahrer benötigten Informationen zur Durchführung eines Fahrstreifenwechsels werden als Manöverempfehlung bezeichnet. Sie sind aus der Analyse des Fahrstreifenwechselvorgangs abgeleitet und beinhalten den Beginn und das Ende der Wechselphase, die zum Wechsel erforderliche, minimale Beschleunigungsänderung und die Wechselrichtung. Die Systemarchitektur des Modells entsteht durch funktionale Aggregation der Gesamtsystemanforderungen und spezifiziert die Module des Systems. Die wesentlichen Module sind die Fahrerabsichtsdetektion und die Fahralternativenbewertung. Die Fahralternativenbewertung wählt aus den vorhandenen Lücken die beste Lücke mit den Kriterien Sicherheit und Vorankommen aus. Die Darstellung der Manöverempfehlung zum Erreichen der bestbewerteten Lücke besteht aus vier Vorsteuerprogrammen, um die Komplexität zu reduzieren und die Systemtransparenz, die Bedienfreundlichkeit sowie die Systemvorhersagbarkeit zu gewährleisten. Die vier Vorsteuerprogramme sind: Wechsel mit Beschleunigung, Wechsel mit Verzögerung, Wechsel ohne Beschleunigung und kein Wechsel. Die Manöverempfehlung wird dem Fahrer mittels Display präsentiert.

Aus Sicherheitsgründen wurde die Systemevaluation auf einem Testgelände durchgeführt. Das Probandenkollektiv von 37 Probanden verteilt sich annähernd gleichmäßig über die Merkmale Alter, Geschlecht und Fahrleistung.

Nach ihrem Systemeindruck befragt, gab die Mehrheit der Probanden an, dass sie das manöverbasierte Fahrstreifenwechselassistenzsystem als intuitiv und nicht irritierend wahrnehmen. Der FSWA führt nicht zu zusätzlichem Stress und wird als komfortables System bewertet.

Die Beanspruchung der Fahrer wurde mittels des angepassten, subjektiven NASA Task Load Index und der objektiven Nebenaufgabenleistung erfasst. Weder eine Verringerung noch eine Erhöhung der Beanspruchung sind mit beiden Verfahren nachweisbar. Für einige Probandengruppen zeigt sich mit der Bewertung der Nebenaufgabenleistung eine signifikante oder nahezu signifikante Reduktion der Beanspruchung. Mit einer weiterentwickelten Version des Fahrstreifenwechselassistenten, einer größeren Anzahl an Probanden und einer längeren Kennenlernphase ist eine signifikante Beanspruchungsreduktion voraussichtlich nachweisbar.

Zur Bewertung der Sicherheit wurde als Kriterium die verfügbare Reaktionszeit entwickelt, die mit lediglich einem zu definierenden Parameter die Sicherheit kontinuierlich beschreibt. Die Sicherheit wird durch LCDAS erhöht. Dieses Resultat wird vom FSWA noch übertroffen, der die Sicherheit gegenüber LCDAS deutlich und gegenüber den Fahrten ohne System verbessert. Somit ist die sicherheitsverbessernde Wirkung des manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenzsystems für ein Szenario auf einem Testgelände mit einem Probandenkollektiv von 37 Personen nachgewiesen.

Um die Aussagekraft der Ergebnisse zu erhöhen, ist das weiterentwickelte System im Feldversuch zu validieren.

Mit dem manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenzsystem wurde eine intentionsgesteuerte Fahrerassistenz entwickelt, die dem Fahrer perzeptive und kognitive Aufgaben abnimmt und so die Sicherheit im Straßenverkehr erhöht, ohne die Fahrzeugführung zu automatisieren.

Somit stellt sich die Frage der Erweiterbarkeit des methodischen Ansatzes, der sich durch eine Fahrer-Fahrzeug-Kommunikation auf Bahnführungsebene mittels Manöverempfehlung und seine Perzeption und Kognition assistierende Wirkung auszeichnet, auf weitere Manöver neben dem Fahrstreifenwechsel. Auf diese Weise wird eine Vernetzung von Fahrerintentionen und Fahrerassistenzfunktionen möglich. Die Entwicklung ist mit dem beschriebenen, methodischen Ansatz nicht mehr von der Technologie oder von Szenarien getrieben, sondern von den Intentionen des Fahrers, die mittels Funktionen adressiert werden.

8 Anhang

8.1 Szenarienkatalog und Elementarszenarien

Die ersten beiden Spalten des Szenarienkatalogs mit den Bezeichnungen 1. und 2. Nachbarfahrstreifen beschreiben die Anordnung des EGO-Fahrzeugs zu weiteren Fahrzeugen auf den Nachbarfahrstreifen. Diese beiden Spalten sind weiterhin unterteilt in Spalten mit den Bezeichnungen Möglichkeit I und Möglichkeit II. Die Spalte Möglichkeit I zeigt die Anordnung von einem potenziellen Kollisionsgegner in Bezug zum EGO-Fahrzeug und die Spalte Möglichkeit II zeigt die Anordnung von 2 bzw. 3 potenziellen Kollisionsgegnern in Bezug zum Prototypenfahrzeug. Die dritte Spalte stellt Fahrstreifenwechselursachen dar und die letzte Spalte gibt die Fahrstreifenwechselrichtung an. Die Zeilen zeigen die Variationsmöglichkeiten der Parameter. Ein Kollisionsszenario setzt sich aus einer Variation jeder Spalte zusammen. Dabei ist die Anordnung der Fahrzeuge auf dem 1. und 2. Nachbarfahrstreifen zu überlagern.

Bei der Anordnung der Fahrzeuge auf dem Nachbarfahrstreifen in Fahrtrichtung wurde eine Einteilung in die 3 Zonen „vor“, „neben“ und „hinter“ dem EGO-Fahrzeug (hier: PV) vorgenommen. Fastenmeier[192] hat in Probandenversuchen Werte für die Einteilung der Zonen ermittelt. Er verwendet die Time-to-Collision (TTC) und die Zeitlücke. Die Fahrstreifenwechselursachen, die im Szenarienkatalog berücksichtigt werden sind:

Ursache 1: Ein Objekt befindet sich auf dem Fahrstreifen.

Ursache 2: Ein stehendes Fahrzeug befindet sich auf dem Fahrstreifen.

Ursache 3: Ein bewegtes Fahrzeug befindet sich auf dem Fahrstreifen.

Ursache 4: Ein bremsendes Fahrzeug befindet sich auf dem Fahrstreifen.

Ursache 5: Autobahnauffahrt oder Ende eines Fahrstreifens

Ursache 6: Autobahnabzweig

Ursache 7: Fahrbahnverengung

Ursache 8: Autobahnabfahrt

Ursache 9: Geschwindigkeitsbeschränkung

Ursache 10: Ein Fahrzeug nähert sich von hinten mit erhöhter Geschwindigkeit und drängelt.

[192] Fastenmeier: Analyse Spurwechselvorgänge, 2001

Ursache 11: An einer Auffahrt wird nach links gewechselt, um dem Auffahrenden Platz zu machen.

Ursache 12: Ein langsameres Fahrzeug wechselt auf den Fahrstreifen des Prototypenfahrzeugs.

Ursache 13: Rechtsfahrgebot

Ursache 14: Beidseitige Fahrbahnverengung

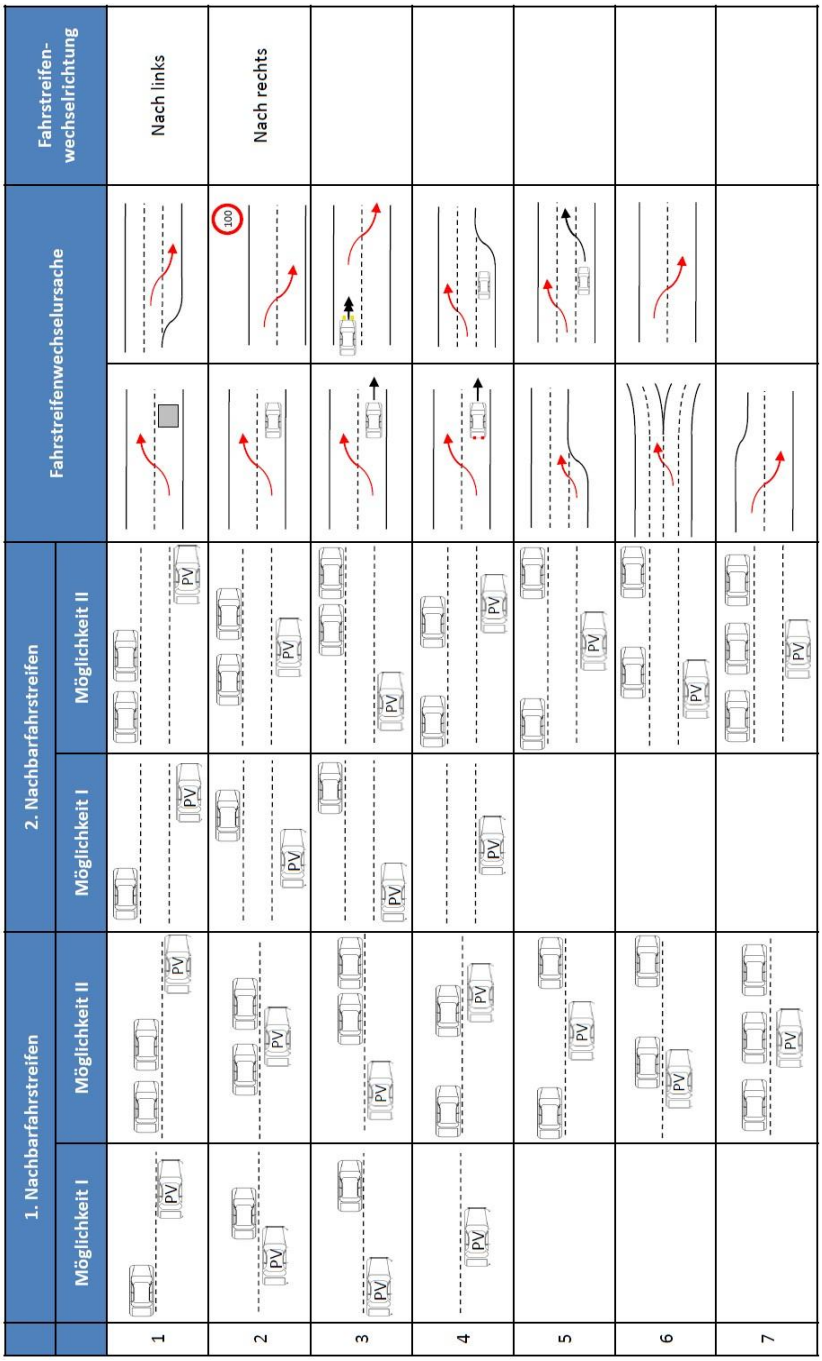


Abbildung 8-1: Szenarienkatalog

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die 8 Elementarszenarien und die zugehörigen Fahralternativen für einen Fahrstreifenwechsel nach links und nach rechts.

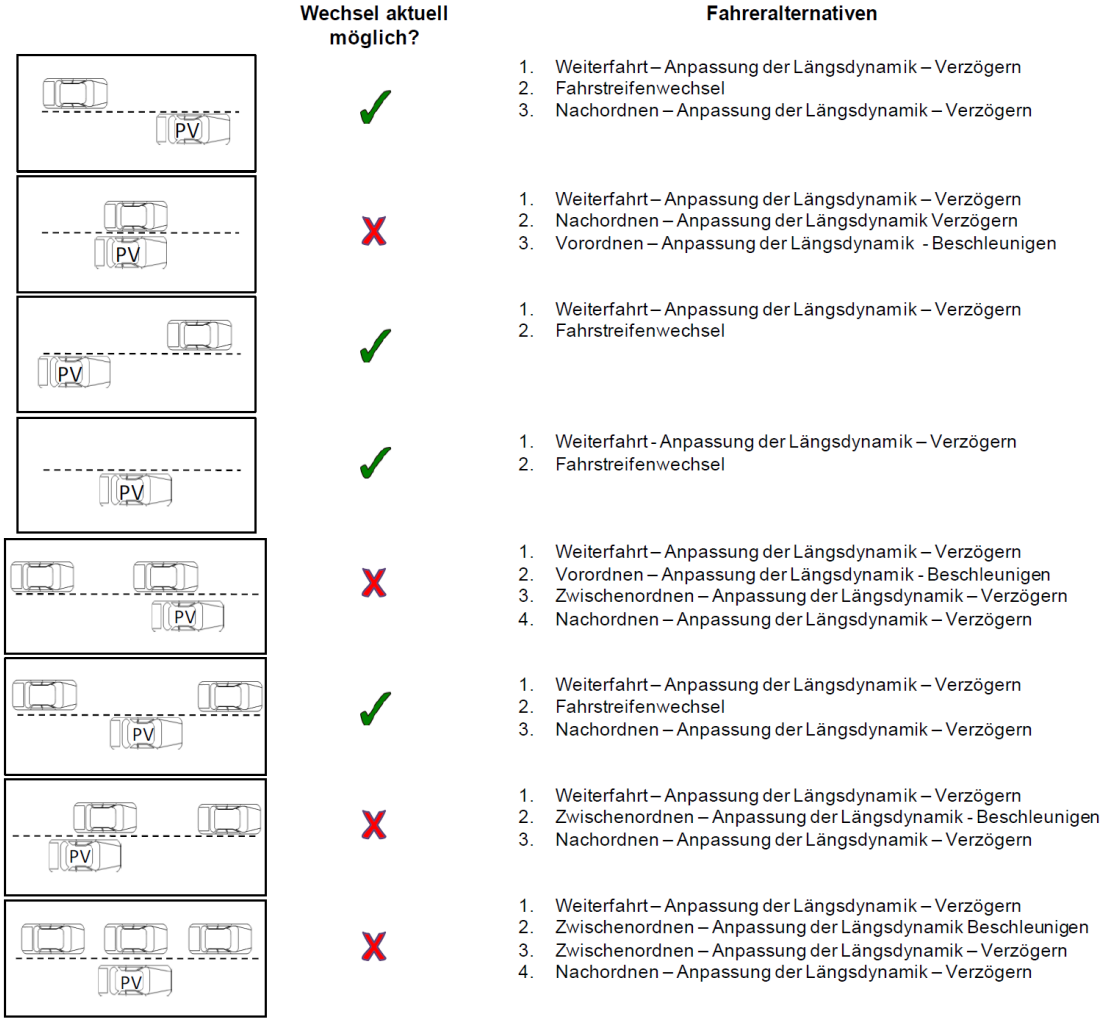


Abbildung 8-2: Elementarszenarien für Fahrstreifenwechsel nach links

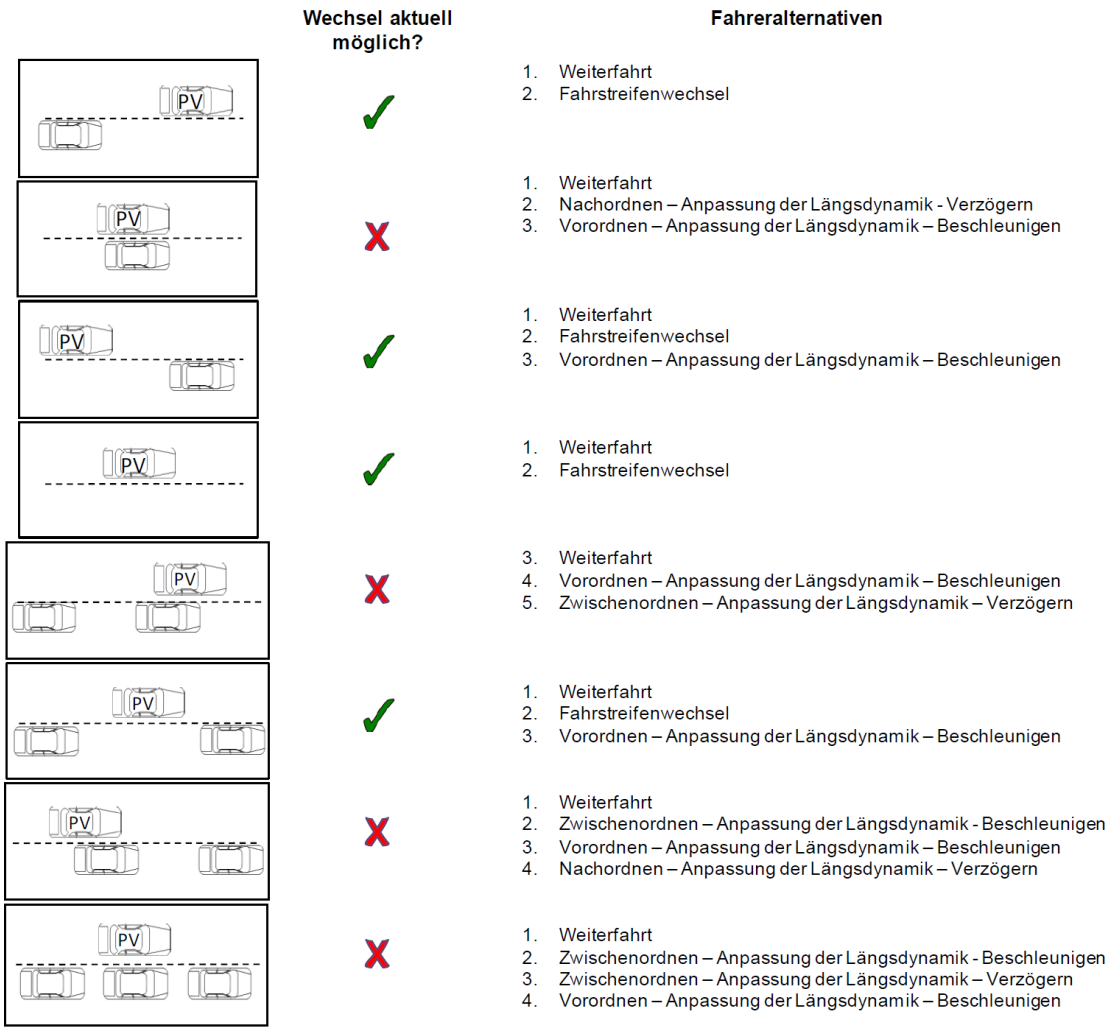


Abbildung 8-3: Elementarszenarien für Fahrstreifenwechsel nach rechts

8.2 Probandenkollektiv

Tabelle 8-1: Fragebogen zur Technikaffinität

1. Elektronische Geräte ermöglichen einen hohen Lebensstandard.
2. Elektronische Geräte machen unabhängig.
3. Es macht mir Spaß, ein elektronisches Gerät auszuprobieren.
4. Elektronische Geräte erleichtern den Alltag.
5. Elektronische Geräte erhöhen die Sicherheit.
6. Ich kenne die meisten Funktionen der elektronischen Geräte, die ich besitze.
7. Elektronische Geräte verursachen Stress. (Skala invertiert)
8. Es fällt mir leicht, die Bedienung eines elektronischen Geräts zu erlernen.

8.3 TLX-Auswertung

Tabelle 8-2: Auswertung der einzelnen Bewertungskriterien als Mittelwert $\overline{x}$ und Standardabweichung σ für 37 Probanden

Bewertungskriterium	**System**	$\overline{x}$	**σ**
Anstrengung	ohne	0,92	0,70
	LCDAS	0,76	0,66
	FSWA	0,80	0,71
Aufgabenerfüllung	ohne	0,74	0,85
	LCDAS	0,63	0,63
	FSWA	0,74	0,67
Zeitliche Beanspruchung	ohne	1,07	0,66
	LCDAS	0,96	0,52
	FSWA	1,13	0,74
Frustration	ohne	1,11	1,02
	LCDAS	1,01	0,69
	FSWA	1,17	0,91
Körperliche Anforderung	ohne	0,56	0,53
	LCDAS	0,56	0,51
	FSWA	0,59	0,52
Mentale Anforderung	ohne	0,83	0,91
	LCDAS	0,71	0,73
	FSWA	0,78	0,70

Tabelle 8-3: Auswertung der Fahrerbeanspruchungspunkte nach Merkmalsausprägungen als Mittelwert $\overline{x}$ und Standardabweichung σ unter Angabe der Probandenanzahl n

Merkmals-ausprägung		**System-variante**	$\overline{x}$	**σ**	**n**
Alter	jung	ohne System	6,4	3,1	11
		mit LCDAS	5,5	2,3	
		mit FSWA	6,0	1,7	
	alt	ohne System	5,2	1,7	15
		mit LCDAS	4,6	1,5	
		mit FSWA	4,9	1,6	
Geschlecht	weiblich	ohne System	5,8	2,8	17
		mit LCDAS	4,7	1,9	
		mit FSWA	5,0	1,3	
	männlich	ohne System	4,7	1,6	20
		mit LCDAS	4,5	1,7	
		mit FSWA	5,4	2,2	
Fahrleistung	< 10.000 km	ohne System	5,9	2,9	15
		mit LCDAS	4,9	2,0	
		mit FSWA	5,5	2,0	
	>= 10.000 km	ohne System	4,8	1,5	22
		mit LCDAS	4,5	1,6	
		mit FSWA	5,0	1,8	

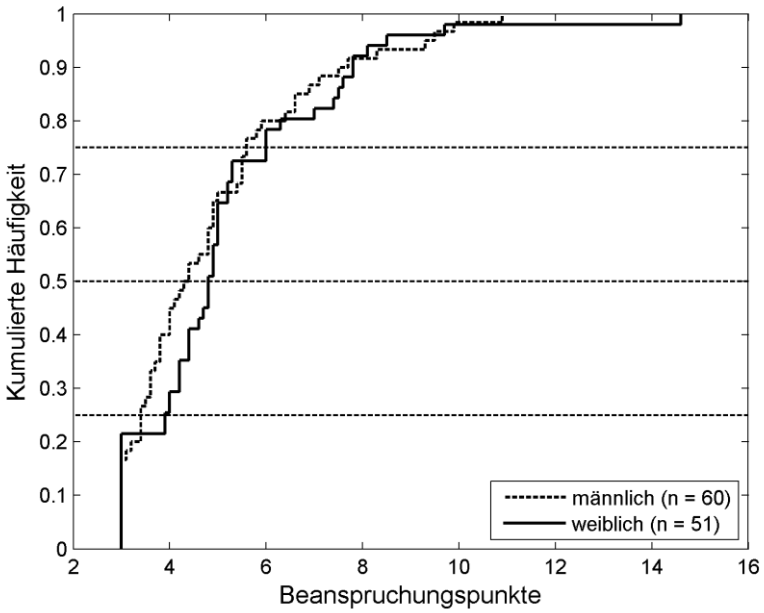


Abbildung 8-4: Beanspruchungspunkte der 37 Probanden in 3 Varianten differenziert nach Geschlecht

8.4 Auswertung der Nebenaufgabenleistung

Tabelle 8-4: Signifikanzwerte der Assistenzsysteme im Vergleich zu den Fahrten ohne System ermittelt mit dem einseitigen t-Test

Merkmal	Ausprägung	System	Signfikanzwert in %
Geschlecht	weiblich	LCDAS	10,3
		FSWA	23,0
	männlich	LCDAS	20,9
		FSWA	6,7
Fahrleistung	groß	LCDAS	4,3
		FSWA	5,9
	gering	LCDAS	45,8
		FSWA	25,5
Alter	alt	LCDAS	27,9
		FSWA	8,3
	jung	LCDAS	10,5
		FSWA	11,8
Technikaffinität	technikaffin	LCDAS	6,5
		FSWA	13,7
	nicht technikaffin	LCDAS	48,1
		FSWA	5,5

8.5 Sicherheitsbewertung

Tabelle 8-5: Signifikanzwerte der Sicherheitsbewertung in %

		ohne System → LCDAS			**ohne System → FSWA**		
		Fzg I	Fzg II	Fzg III	Fzg I	Fzg II	Fzg III
gesamtes Kollektiv		0,8	0,2	$2{,}7*10^{-3}$	$1{,}5*10^{-15}$	$1{,}3*10^{-7}$	$3{,}2*10^{-8}$
Geschlecht	männlich	4,8	13,5	0,59	$7{,}8*10^{-10}$	$6{,}1*10^{-4}$	$2{,}5*10^{-4}$
	weiblich	6,8	0,4	0,13	$9{,}8*10^{-6}$	$1{,}2*10^{-2}$	$2{,}3*10^{-3}$
Alter	jung	96,4	65,1	6,6	$3*10^{-5}$	$2{,}8*10^{-2}$	$4{,}8*10^{-2}$
	alt	0,8	0,6	2,3	$1{,}4*10^{-5}$	$5{,}1*10^{-2}$	0,2
Fahrleistung	gering	15,7	59,3	0,5	$3{,}7*10^{-8}$	$9{,}7*10^{-3}$	$2{,}6*10^{-8}$
	groß	2,1	$3*10^{-2}$	0,17	$9{,}5*10^{-9}$	$5{,}2*10^{-4}$	$2{,}6*10^{-2}$
Technikaffinität	technikaffin	4,1	5,9	$1{,}2*10^{-2}$	$4{,}2*10^{-12}$	$1{,}2*10^{-4}$	$2{,}4*10^{-6}$
	nicht technikaffin	8,7	0,2	6,5	$1{,}5*10^{-2}$	$3{,}9*10^{-2}$	0,7

Tabelle 8-6: Signifikanzwerte der Sicherheitsbewertung in % mit angepasstem Sicherheitskriterium (D_0 = 8 m/s²)

		ohne System → LCDAS			**ohne System → FSWA**		
		Fzg I	Fzg II	Fzg III	Fzg I	Fzg II	Fzg III
gesamtes Kollektiv		0,6	0,3	$2*10^{-3}$	$3{,}1*10^{-13}$	$7{,}4*10^{-7}$	$1{,}3*10^{-8}$
Geschlecht	männlich	3,0	16,9	0,6	$6{,}4*0^{-8}$	$2{,}2*10^{-3}$	$1{,}1*10^{-4}$
	weiblich	8,1	0,5	0,1	$2{,}8*10^{-5}$	$1{,}2*10^{-2}$	$1{,}8*10^{-3}$
Alter	jung	77,9	77,4	6,5	$3{,}1*10^{-4}$	0,12	$9{,}3*10^{-3}$
	alt	0,8	0,6	1,7	$9{,}5*10^{-5}$	$5{,}1*10^{-2}$	0,4
Fahrleistung	gering	14,9	72,7	0,4	$2{,}3*10^{-5}$	$9{,}9*10^{-3}$	$1{,}5*10^{-6}$
	groß	1,7	$2{,}9*10^{-2}$	0,2	$4{,}4*10^{-7}$	$1{,}7*10^{-3}$	$2{,}1*10^{-4}$
Technikaffinität	technikaffin	2,0	8,3	$9{,}7*10^{-3}$	$1{,}3*10^{-10}$	$5{,}0*10^{-4}$	$3{,}5*10^{-7}$
	nicht technikaffin	19,4	0,1	5,9	0,1	$2{,}8*10^{-2}$	1,3

Literaturverzeichnis

Abendroth, Bettina: Gestaltungspotentiale für ein PKW-Abstandsregelsystem unter Berücksichtigung verschiedener Fahrertypen; Technische Universität Darmstadt, Ergonomia Verlag, Stuttgart; ISBN 3935089627, 2001.

Abendroth, Bettina; Bruder, Ralph: Die Leistungsfähigkeit des Menschen für die Fahrzeugführung; Handbuch Fahrerassistenzsysteme - Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort, 1. Aufl. Auflage, Vieweg & Teubner, 2009, S. 4 – 14.

Bartels, Arne; Steinmeyer, Simon; Brosig, Stefan; Spichalsky, Carsten: Fahrstreifenwechselassistenz; Handbuch Fahrerassistenzsysteme - Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort, 1. Auflage, Vieweg & Teubner, Darmstadt, 2009, S. 562 – 570.

Bascuana, Jose L.: Analysis of Lane Change Crash Avoidance, SAE Technical Paper 951895, 1995.

Benmimoun, Ahmed: Der Fahrer als Vorbild für Fahrerassistenzsysteme? Ein fahrermodellbasierter Ansatz zur Entwicklung von situationsadaptiven Fahrerassistenzsystemen; in 13. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen, 2004, S. 683-700.

Berger, Christian; Rumpe, Bernhard: Autonomes Fahren - Erkenntnisse aus der DARPA Urban Challenge; in Information Technology, Oldenbourg Wissenschaftsverlag; 2008, S. 258 – 265.

Bertozzi, Massimo et al.: VIAC: an Out of Ordinary Experiment; in Intelligent Vehicles Symposium (IV), 05.-09.06.2011, S. 175-181.

Blaschke, Christoph; Schmitt, Josef; Färber, Berthold: Überholmanöver-Prädiktion über CAN-Bus-Daten; in Automobiltechnische Zeitschrift, 2008.

BMBF Invent: Stauassistent – STA, 2005.

BMBF Invent: Vorausschauende Aktive Sicherheit, 2005.

BMW Group München: Pressemappe: Fahrerassistenzsysteme. Mehr Komfort, mehr Souveränität, mehr Sicherheit, August 2008.

BMW Group München: Präsentation im Rahmen der BMW Innovationstage Connected Drive meets Efficient Dynamics: Lateral Collision Avoidance, Oktober 2010.

BMW Group München: Pressemitteilung: Aktive und passive Sicherheit bei der BMW Group, Oktober 2008.

Bortz, Jürgen: Statistik für Sozialwissenschaftler; 5., vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage, Springer, Berlin, 1999, S. 15.

Bruder, Ralph; Abendroth, Bettina; Landau, Kurt: Zum Nutzen von Fahrversuchen für die Gestaltung; in Darmstädter Kolloquium Mensch & Fahrzeug: Wie objektiv sind Fahrversuche? 14. - 15. März 2007, Darmstadt, S. 79 – 95.

Bruder, Ralph; Didier, Muriel: Gestaltung von Mensch-Maschine-Schnittstellen; Handbuch Fahrerassistenzsysteme - Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort, 1. Aufl. Auflage, Vieweg & Teubner, 2009, S. 314 – 324.

Bruder, Ralph; Landau, Kurt; Woyna, Lars: Bedienelemente; Handbuch Fahrerassistenzsysteme - Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort, 1. Aufl. Auflage, Vieweg & Teubner, 2009, S. 325 – 329.

Bubb, Heiner: Wie viele Probanden braucht man für allgemeine Erkenntnisse aus Fahrversuchen?; in Darmstädter Kolloquium Mensch & Fahrzeug, Darmstadt, 2003, S. 26 – 39.

Bubb, Heiner; Plavsic, Marina;. Duschl, Markus; Tönnis, Marcus, Klinker, Gudrun: Ergonomic Design and Evaluation of Augmented Reality Based Cautionary Warnings for Driving Assistance in Urban Environments?; in 17th World Congress on Ergonomics, Beijing, China, 2009, S. 26 – 39.

Buld, Susanne; Krüger, Hans-Peter; Hoffmann, Sonja; Kraussner, A.; Tietzke, H.; Totzke, Ingo.: Wirkung von Assistenz und Automation auf Fahrerzustand und Fahrsicherheit Projekt EMPHASIS (Effort-Management and Performance Handling in sicherheitsrelevanten Situationen), September 2002.

Burckhardt, Manfred: Reaktionszeiten bei Notbremsvorgängen, Verlag TÜV Rheinland, Köln; ISBN 1985.

Choudhury, Charisma Farheen: Modeling Driving Decisions with Latent Plans; Massachusetts Institute of Technology, Boston, 2007.

Dagli, Ismail; Brost, Michael; Breuel, Gabi: Action Recognition and Prediction for Driver Assistance Systems Using Dynamic Belief Networks; in Agent Technology Workshops 2002, S. 179 – 194.

Deutsches Institut für Normung: DIN EN ISO 13407: Benutzer-orientierte Gestaltung interaktiver Systeme; 1999.

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt: Pressemitteilung: Assistenz- und Automationsstufen erhöhen zukünftig Fahrsicherheit, Effizienz und Komfort, Juni 2011; 2011.

Döhler, Hermann; Nitsche, Klaus: Neue mathematische Erkenntnisse zu Reaktionszeiten bei Notbremsvorgängen; in Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 2008.

Donges, Edmund: Aspekte der aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen; in Automobil-Industrie, 1982, S. 183-190.

Donges, Edmund: Fahrerverhaltensmodelle; Handbuch Fahrerassistenzsysteme - Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort, 1. Aufl. Auflage, Vieweg & Teubner, 2009, S. 15-23.

Ehmanns, Dirk; Zahn, Peter; BMW Group München,: Konzept einer integrierten Fahrerassistenz am Beispiel eines Querführungsassistenten; in 11. Aachener Kolloquium Fahrzeug und Motorentechnik 2002, Aachen, S. 17.

Färber, Georg: Seminarband: Automobile Zukunft - I
Computersysteme Sommersemester 2004.

Färber, Berthold: Erhöhter Fahrernutzen durch Integration von Fahrerassistenz- und Fahrerinformationssystemen, 2005.

Fastenmeier, Wolfgang: Autofahrer und Verkehrssituation, Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1995.

Fastenmeier, Wolfgang; Hinderer, Jürgen; Lehnig, Ulf; Gstalter, Herbert: Analyse von Spurwechselvorgängen im Verkehr; in Zeitschrift für Arbeitswissenschaften, 2001, S. 15-23.

Fastenmeier, Wolfgang; Gstalter, Herbert: Anforderungsgerechtes Autofahren: wie zuverlässig sind jüngere und ältere Autofahrer?; Fahrer im 21. Jahrhundert - der Mensch als Fahrer und seine Interaktion mit dem Fahrzeug, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2005, S. 113 – 127.

Fecher, Norbert: Analyse des stationären Folgeverhaltens von Pkw-Fahrzeugführern unter Berücksichtigung von Nässe und einhergehender Sichtbehinderung, Fortschrittberichte VDI : Reihe 12, Verkehrstechnik, Fahrzeugtechnik, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2005.

Fecher, Norbert; Regh, Fabian; Habenicht, Stefan; Hoffmann, Jens; Winner, Hermann: Test- und Bewertungsmethoden für Sicherheitssysteme der Bahnführungsebene; in at – Automatisierungstechnik, 2008, S. 592-600.

Filzek, Björn: Abstandsverhalten auf Autobahnen; Technische Universität Darmstadt, 2002.

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Richtlinien für die Anlage von Straßen – Teil: Querschnitt; 1996.

Friedrichs, Andreas; Große-Kappenberg, S.; Happe, Johannes: Erprobung von Fahrerassistenzsystemen mit dem Interactive Driving Simulator; in Erprobung und Simulation in der Fahrzeugentwicklung, 2005, S. 37-55.

Graab, Birgit; Donner, Eckart; Chiellino, Ulrich; Hoppe, Maria: Analyse von Verkehrsunfällen hinsichtlich unterschiedlicher Fahrerpopulationen und daraus ableitbarer Ergebnisse für die Entwicklung adaptiver Fahrerassistenzsysteme; in Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz 2008.

Green, Marc: How Long Does It Take to Stop?; TRANSPORTATION HUMAN FACTORS, 2000, S. 195-216.

Green, Paul; Williams, Eileen Hoekstra; George, Kellie; Wen, Cathy: Integrated Vehicle-Based Safety Systems (IVBSS): Human Factors and Driver-Vehicle Interface (DVI) Summary Report, 2008.

Gründl, Martin: Fehler und Fehlverhalten als Ursache von Verkehrsunfällen und Konsequenzen für das Unfallvermeidungspotenzial und die Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen; Universität Regensburg, 2005.

Habenicht, Stefan Winner, Hermann; Bone, Sven; Sasse, Fabian; Korzenietz, Peter: A maneuver-based Lane Change Assistance System; in Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2011 IEEE, 05.-09. Juni 2011, Intelligent Vehicles Symposium (IV), Baden-Baden, 2011.

Hakuli, Stephan et al.: Kooperative Automation; Handbuch Fahrerassistenzsysteme - Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort ; mit 45 Tabellen, 1. Aufl. Auflage, Vieweg & Teubner, Wiesbaden, 2009, S. 647 ff.

Hakuli, Stephan; Kluin, Matthias, Geyer, Sebastian; Winner, Hermann: Development and Validation of Manoeuvre-Based Driver Assistance Functions for Conduct-by-Wire with IPG CarMaker; in FISITA 2010 World Automotive Congress, 30. Mai - 04. Juni 2010 in Budapest.

HAVEit: Pressemitteilung: Fahren per Knopfdruck, Juni 2011.

Heesen, Matthias; Kelsch, Johann; Löper, Christian; Flemsisch, Frank: Haptisch-multimodale Interaktion für hochautomatisierte, kooperative Fahrzeugführung bei Fahrstreifenwechsel-, Brems- und Ausweichmanövern; in 11. Braunschweiger Symposium Automatisierungs-, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel (AAET), 10.-11. Februar 2010.

Hella: Pressemitteilung: Spurwechselwarnung von Hella für den neuen BMW 7er, August 2008.

Henning; Matthias Johannes: Preparation for lane change manoeuvres; Technische Universität Chemnitz, 2010.

Hering, Klaus: Situationsabhängige Verfahren zur standardisierten Messung der kognitiven Beanspruchung im Straßenverkehr; Universität zu Köln, Düsseldorf, 1999.

Hochstädter, Almut; Zahn, Peter; Breuer, Karsten: Ein universelles Fahrermodell mit den Einsatzbeispielen Verkehrssimulation und Fahrsimulator; in 9. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 04.-06. Oktober 2000.

Hoffmann, Jens; Gayko, Jens: Fahrerwarnelemente; Handbuch Fahrerassistenzsysteme - Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort, 2., korrigierte Auflage. Auflage, Vieweg & Teubner, Wiesbaden; 2012, S. 343-354.

Ilmarinen, Juhani; Tempel, Jürgen; Giesert, Marianne: Arbeitsfähigkeit 2010, VSA-Verl, Hamburg, 2002, S. 359.

International Organization for Standardization: ISO 10075: Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung, 2000.

International Organization for Standardization: ISO 150 Aspekte von Fahrerinformations- und Assistenzsystemen, Oktober 2003.

International Organization for Standardization: ISO 17387: Intelligent transport systems — Lane Intelligent transport systems — Lane change decision aid systems (LCDAS), 2008.

International Organization for Standardization: ISO 22179 - Full Speed Range ACC, 2009.

Jin, Li-sheng Fang, Wen-ping; Zhang, Ying-nan; Yang, Shuang-bin; Hou, Hai-jing: Research on Safety Lane Change Model of Driver Assistant System on Highway; 2009 IEEE Intelligent Vehicles Symposium - IEEE IV 2009, ACM Press, Xi'an; 2009, S. 1051 - 1056.

Jula, Hossein; Kosmatopoulos, Elias B.; Ioannou, Petros A.: Collision Avoidance Analysis for Lane Changing and Merging; 1999.

Jürgen Dettinger: Reaktionsdauer bei Notbremsvorgängen; in Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 2008, S. 180-234.

Kanaris, Alexander; Kosmatopoulos, Elias B.; Ioannou, Petros A.: Strategies and spacing requirements for lane changing and merging in automated highway systems; transactions on vehicular technology, 2001, S. 1568-1581.

Kauer, Michaela; Schreiber, Michael; Bruder, Ralph: How to conduct a car? A design example for maneuver based driver-vehicle interaction; 2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium - IV ; 21 - 24 June 2010, University of California, San Diego, CA, USA, IEEE, Piscataway, NJ, 2010, S. 1214 ff.

Kelsch, Johann; Heesen, Matthias; Löper, Christian; Flemisch, Frank: Balancierte Gestaltung kooperativer multimodaler Bedienkonzepte für Fahrerassistenz und Automation: H-Mode beim Annähern, Notbremsen, Ausweichen; in 8. Berliner Berliner Werkstatt MMS, 7.-9.10.2009.

Kirchner, Johannes-Henrich; Baum, Eckart: Ergonomie für Konstrukteure und Arbeitsgestalter, Carl Hanser, München, 1990.

Kirchner, Alexander; Schulenber, Peter; Schöning, Volkmar: DE102005050662A1: Autobahnassistent, 2005.

Kirkpatrick, Marshall: Google's Self-Driving Car Is Just the Beginning; in New York Times, 2010.

Knipling, Ronald: IVHS Technologies Applied to Collision Avoidance: IVHS Technologies Applied to Collision Avoidance: Perspectives on Six Target Crash Types and Countermeasures, 1993.

Knoll, Peter: Anzeigen für Fahrerassistenzsysteme; Handbuch Fahrerassistenzsysteme - Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort, 1. Aufl. Auflage, Vieweg & Teubner, 2009, S. 330 – 342.

Knothe, Frank et al.: Die neue CL-Klasse von Mercedes-Benz; in Automobiltechnische Zeitschrift, 2008, S. 800 ff.

Kodaka, Kenji; Otabe, Makoto; Urai, Yoshirio, Koike, Hiroyuki: Rear-end Collision Velocity Reduction System; in Honda R & D Technical Review, Honda R & D Co, WakÅo, 2001, S. 159-166.

Kölbl, Christian; Zahn, Peter: Entwicklung eines integrierten Quer- und Längsreglers zur Fahrzeugführung; in 15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2006.

König, Winfried: Nutzergerechte Entwicklung der Mensch-Maschine-Interaktion von Fahrerassistenzsystemen; Handbuch Fahrerassistenzsysteme - Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort, 2., korrigierte Auflage, Vieweg & Teubner, Wiesbaden, 2012.

Kraftfahrt-Bundesamt: Bundeseinheitlicher Tatbestandskatalog, 01.02.2009.

Lange, Christian: Wirkung von Fahrerassistenz auf der Führungsebene in Abhängigkeit der Modalität und des Automatisierungsgrades; Technische Universität München, 2008.

LeBlanc, D. et al.: Road Departure Crash Warning System Field Operational Test: Methodology and Results (Volume 1), 2006.

Lee, Suzanne E. ; Olsen, Erik C.B.; Wierwille, Walter W.: A Comprehensive Examination of Naturalistic Lane-Changes, März 2004.

Lüke, Stefan; Darms, Michael; Komar, Matthias; Waldbauer, Michael: Ein Assistenzsystem zur Unterstützung des Fahrers in Baustellen; AAET - Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel - Beiträge zum gleichnamigen 11. Braunschweiger Symposium vom 10. und 11. Februar 2010, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. am Forschungsflughafen, Braunschweig, 2010.

Maier, Peter Herbert: Räumliches Vorstellungsvermögen; 1. Auflage, Auer, Donauwörth, 1999.

Mammar, Said; Glaser, Sebatien; Netto, Mariana: Time to Line Crossing for Lane Departure Avoidance: A Theoretical Study and an Experimental Setting; Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2006, S. 226-241.

Mann, Mathias: Benutzerorientiert Entwicklung und fahrergerechte Auslegung eines Querführungsassistenten, 2008.

Mannale, Roman; Hohm, Andree; Schmitt, Ken; Isermann, Rolf; Winner, Hermann: Ansatzpunkte für ein System zur Fahrerassistenz in Überholsituationen; in Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz, 7. - 8. April 2008, Garching.

Meitinger, Karl-Heinz; Heißing, Bernd; Ehmanns, Dirk
Beispiel für die Top-Down-Entwicklung eines Aktiven Sicherheitssystems, 2006.

O'Donnell, Colonel Robert D.; Eggemeier, F. Thomas: Workload Assessment Methodology; Handbook of Perception and Human Performance - Cognitive processes and performance, Wiley, New York, 1986, S. 42-1 - 42-49.

Oliver, Nuria; Pentland, Alex P.: Graphical Models for Driver Behavior Recognition in a Smart Car; in lEEE Intelligent Vehicles Symposium 2000, 03.-05. Oktober 2000, Dearborn (MI), USA, 2000.

psychonomics: Autofahrer-Typen auf Deutschlands Straßen, AXA Direkt Versicherungs-AG, 1997.

Rasmussen, Jens: Skills, Rules, and Knowledge; Signals, Signs, and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models; in IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1983, S. 257-266.

Rasmussen, Jens: Human Errors: A taxonomy for describing human malfunction in industrial installations; in Journal of Occupational Accidents, Elsevier Scientific Publishing, Amsterdam, 1982, S. 311-333.

Reif, Konrad: Automobilelektronik; 1. Aufl. Auflage, Vieweg, Wiesbaden, 2006.

Response 3: Code of Practice for the Design and Evaluation of ADAS, 2009

Riedel, Andreas; Arbinger, Roland: Subjektive und objektive Beurteilung des Fahrverhaltens von Pkw, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 1998.

Robert Bosch AG: Pressemitteilung: Side View Assist - der Totiwnkel Assistent, Dezember 2010.

Roelofsen, Mark; Bie, Jing; Jin, Lisheng; van Arem, Bart: Assessment of Safety Levels and an Innovative Design for the Lane Change Assistant; in 2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, San Diego, 21 - 24 June 2010, Piscataway, NJ; 2010.

Sackmann, Reinhold; Weymann, Ansgar: Die Technisierung des Alltags, Campus-Verl, Frankfurt/Main; New York, 1994.

Saust, F.; Wille, J. M.; Lichte, B.; Maurer, M.: Autonomous Vehicle Guidance on Braunschweig's inner ring road within the Stadtpilot Project; in Intelligent Vehicles Symposium (IV), Baden-Baden, 2011.

Sayer, J. et al.: Integrated Vehicle-Based Safety Systems - Field Operational Test Final Program Report, Juni 2011.

Schmitt, Ken; Habenicht, Stefan; Isermann, Rolf: Odometrie und Manövererkennung für ein Fahrerassistenzsystem für Überholsituationen; in 1. Automobiltechnisches Kolloquium München, 16. & 17. April 2009.

Schneider, Jörg Henning: Modellierung und Erkennung von Fahrsituationen und Fahrmanövern für sicherheitsrelevante Fahrerassistenzsysteme; TU Chemnitz, Chemnitz, 2009, S. 19.

Schroven, F.; Giebel, T.: Fahrerintentionserkennung für Fahrerassistenzsysteme; in 24. VDI/VW- Gemeinschaftstagung - Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme, Wolfsburg, 2008.

Schulze, Matthiaset al.: IP PReVENT 2008 Final Report, 2008.

Spanner-Ulmer, Birgit; Kienast, Henning; Henning, Matthias; Lindner, Philipp, Weigel, Hendrik; Krems, Josef; Wanielik, Gerd: Aufmerksamkeitssteuerung mit räumlich gerchteten Anzeigen bei Fahrerassistenzsystemen; in 24. VDI/VW-Gemeinschaftstagung - Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme, Wolfsburg, 2008, S. 413 - 424.

Sporrer, A.; Prell, G.; Buck, J.; Schaible, S.: Realsimulation von Spurwechsel-vorgängen im Straßenverkehr; 1998.

Stanczyk, Thomas L; Rafal, Jurecki: Fahrerreaktionszeiten in Unfallrisikosituationen; in VKU, 2008, S. 235-246.

Statistisches Bundesamt: Verkehr 2010 - Verkehrsunfälle, 06.07.2011; 2011, S. 323.

Statistisches Bundesamt: Verkehrsunfälle 2010 - Unfälle von 18- bis 24-Jährigen im Straßenverkehr, 30. August 2011.

Thoma, Stephan; Lindberg, Thomas: Gestaltung von Geschwindigkeitsempfehlungen während der Annäherung an eine Ampel; in 54. Frühjahrskongress 2008 der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V, Garching, 2008.

Tränkle, Ulrich; Metker, Thomas: Über die Schwierigkeiten, die jüngere und ältere Fahrerinnen und Fahrer bei verschiedenen Fahr- und Manövrieraufgaben erleben; in Zeitschrift für Verkehrssicherheit, 1992, S. 54 - 62.

Treiber, Martin; Kesting, Arne: Modeling Lane-Changing Decision with MOBIL; Traffic and Granular Flow, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg; 2009, S. 211-221.

Ulmer, Berthold: VITA II - Active Collision Avoidance in Real Traffic, 1994.

van Arem, Bart; van Driel, Cornelie: Investigation of user needs for driver assistance: results of an Internet questionaire, 2005.

VDI: Auto: Erhöhung der Sicherheit interessiert Fahrer am meisten; in VDI nachrichten, 2002.

Vogel, Katja: A comparison of headway and time to collision as safety indicators; in Acccident analysis and prevention, 2003, S. 427-433.

Volkswagen: Pressemitteilung: Forschungsprojekt AKTIV: Intelligente Fahrzeugassistenten bringen zukünftig noch mehr Sicherheit auf die Straße, Juni 2010.

von der Beeck, Michael: Development of logical and technical architectures for automotive systems; in Software and systems modeling, 1619-1366, 2006.

Weinberger, Markus: Der Einfluß von Adaptive Cruise Control Systemen auf das Fahrerverhalten; Technische Universität München, Berichte aus der Ergonomie, Shaker, Aachen, 2001.

Wickens, Christopher D.; Vincow, Michelle; Yeh, Michelle: Design applications of visual spatial thinking; The Cambridge handbook of visuospatial thinking, Cambridge University Press, Cambridge; 2005, S. 383-425.

Willumeit, Peter; Jürgensohn, Thomas: Fahrermodelle - ein kritischer Überblick; in Automobiltechnische Zeitschrift, 1997, S. 424-428.

Winner, Hermann; Hakuli, Stephan: Conduct-by-Wire : following a new paradigm for driving into the future; in FISITA 2006 World Automotive Congress : 22 - 27 October, Yokohama, Japan organized by FISITA, 2006.

Winner, Hermann: Frontalkollisionsschutzsysteme; Handbuch Fahrerassistenzsysteme - Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort; mit 45 Tabellen, 1. Aufl. Auflage, Vieweg & Teubner, Wiesbaden, 2009, S. 522-542.

Winner, Hermann; Weitzel, Alexander: Die Freigabefalle des autonomen Fahrens; in Mensch und Fahrzeug, 06.-07.04.2011, Mensch und Fahrzeug, Darmstadt, 2011.

Wu, Jianping; Brackstone, Mark; McDonald, Mike: Fuzzy sets and systems for a motorway microscopic simulation model; in Fuzzy Sets and Systems, 1998, S. 65-76.

Zahn, Peter; Ehmanns, Dirk; Spannheimer, Helmut; Freymann, Raymond: Integrierte Längs- und Querführung; in Automobiltechnische Zeitschrift, 2003.

Eigene Veröffentlichungen

Schmitt, Ken; Habenicht, Stefan; Isermann, Rolf: Odometrie und Manövererkennung für ein Fahrerassistenzsystem für Überholsituationen; in 1. Automobiltechnisches Kolloquium München, 16. & 17. April 2009, 1. Automobiltechnisches Kolloquium München, München, 2009

Fecher, Norbert; Regh, Fabian; Habenicht, Stefan; Hoffmann, Jens; Winner, Hermann: Test- und Bewertungsmethoden für Sicherheitssysteme der Bahnführungsebene; in at - Automatisierungstechnik; ISSN 10.1524/auto.2008.0736, 2008, S. 592-600

Habenicht, Stefan; Winner Hermann; Bone, Sven; Sasse, Fabian; Korzenietz, Peter: A maneuver-based Lane Change Assistance System; in Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2011 IEEE, 05.-09. Juni 2011, Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2011 IEEE, Baden-Baden, 2011

Rodemerk, Claas; Habenicht, Stefan; Weitzel, Alexander; Winner, Hermann; Schmitt, Thomas: Development of a general criticality criterion for the assessment of driving situations and application on a maneuver-based lane change assistance system; in Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2012 IEEE, 03.-07. Juni 2012, Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2011 IEEE, Alcalá de Henares, 2012

Betreute studentische Arbeiten

Dwyer, Darcy: Development and Realization of a Display for Driver Assistance in Lane Change Situations. 2009, Summer Project am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt

Freund, Maximilian: Ermittlung des Unterstützungsbedarfs bei Fahrstreifenwechseln basierend auf Fahrversuchen mit Probanden. 2009, Bachelor Thesis Nr. 981/08 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt

Goos, Jan-Christoph: Fahrerabsichtserkennung zum Fahrstreifenwechsel mit Hilfe eines Fuzzy-Algorithmus. 2009, Bachelor Thesis Nr. 995/09 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt

Grebner: Josep: Konzeption eines Systems zur Einschätzung der Kollisionsrisiken für einen Fahrstreifenwechselassistenten. 2009, Studienarbeit Nr. 987/08 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt

Haag, Sebastian: Ermittlung der Fahrerbeanspruchung bei Fahrstreifenwechselmanövern. 2010, Bachelor Thesis Nr. 1014/09 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt

Herold, Joachim: Realisierung und Optimierung von Warnelementen zur Fahrerassistenz in Fahrstreifenwechselsituationen. 2009, Bachelor Thesis Nr. 996/09 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt

Korzenietz, Peter: Konzeption und Validierung der Systemarchitektur eines manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenten. 2010, Diplomarbeit Nr. 480/10 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt

Lange, Lena: Realisierung und Optimierung einer Mensch-Maschine Schnittstelle zur manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenz. 2010, Studienarbeit Nr. 1022/09 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt

Lickroth, Jan: Konzeption einer manöverbasierten Strategie zur Fahrerunterstützung bei Fahrstreifenwechseln. 2009, Diplomarbeit Nr. 458/09 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt

Lind, Peter: Ermitteln von Elementen und Strategien zur Unterstützung und Förderung von Fahrstreifenwechselmanövern. 2009, Bachelor Thesis Nr. 984/08 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt

Mujkanovic, Mirnes: Konzeption eines Versuchsdesigns zur Sicherheitsbewertung eines manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenzsystems. 2011, Studienarbeit Nr. 1048/10 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt

Müller, Marius: Konzeption einer Steuerung für einen Lenkradmomentensteller zur manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenz. 2010, Bachelor Thesis Nr. 1025/10 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt

Nickels, Harald: Konzeption eines Systems zur Auswertung von Fahralternativen bei Fahrstreifenwechseln. 2009, Diplomarbeit Nr. 464/09 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt

Ricklefs, Niels: Durchführung und Auswertung von Probandenversuchen zur Evaluierung eines manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenten. 2011, Bachelor Thesis Nr. 1083/11 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt

Sahin, Hakan: Literaturrecherche zum Stand der Technik der manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenz. 2011, Bachelor Thesis Nr. 1077/11 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt

Sapok, Lukas: Konzeption einer multimodalen Mensch-Maschine-Schnittstelle für einen manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenten. 2011, Bachelor Thesis Nr. 1057/10 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt

Sasse, Fabian: Konzeption einer auf Fuzzy-Logik basierenden Methode zur Detektion der Fahrstreifenwechselabsicht. 2011, Master Thesis Nr. 485/10 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt

Schmitt, Thomas: Evaluation eines manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenten hinsichtlich Sicherheit in Fahrversuchen. 2011, Bachelor Thesis Nr. 1078/11 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt

Schumacher, Marc: Aufbau und Inbetriebnahme eines Kommunikationssystems zur manöverbasierten Assistenz bei Fahrstreifenwechseln. 2009, Studienarbeit Nr. 993/09 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt

Schweitzer, Christoph: Entwickeln von Elementen und Strategien zur Fahreralarmierung in Fahrstreifenwechselsituationen. 2009, Bachelor Thesis Nr. 983/08 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt

Selinski, Jewgeni: Konzeption und Realisierung einer Mensch-Maschine-Schnittstelle zur Fahrerunterstützung bei Fahrstreifenwechseln. 2009, Bachelor Thesis Nr. 1001/09 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt

Sommerfeld, Martin: Konzeption eines Versuchsdesigns zur Komfortbewertung eines manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenzsystems. 2011, Studienarbeit Nr. 1060/10 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt

Tazir, Nora: Konzeption von Versuchsszenarien für die Bewertung eines manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenten mit Probanden. 2010, Diplomarbeit Nr. 468/09 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt

Vey, Christian: Konzeption und Realisierung einer Methode zur Auswahl von Vorsteuerprogrammen für einen Fahrstreifewechselassistenten. 2010, Bachelor Thesis Nr. 1016/09 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt

Wallisch, Michael: Plausibilitätskontrolle von Versuchsmessungen zur manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenzentwicklung. 2010, Bachelor Thesis Nr. 1035/10 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name:	Stefan Habenicht
Geburtsdatum:	17. Oktober 1981
Geburtsort:	Helmstedt
Familienstand:	verheiratet
Staatsangehörigkeit:	deutsch

Schulzeit

1988 – 1992	Friedensschule in Groß-Zimmern
1992 – 1994	Albert-Schweitzer-Schule in Groß-Zimmern
1994 – 1998	Gymnasialzweig der Goetheschule in Dieburg
1998 – 2001	Oberstufengymnasium Alfred-Delp-Schule in Dieburg Abschluss: Abitur

Zivildienst

2001 – 2002	Caritas in Münster bei Dieburg

Studium

2002 – 2008	Studium Allgemeiner Maschinenbau Technische Universität Darmstadt Abschluss: Diplom-Ingenieur

Berufstätigkeit

2008 - 2011	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Fahrzeug-technik der Technischen Universität Darmstadt
seit 2012	Entwicklungsingenieur der Linde Material Handling GmbH in Aschaffenburg