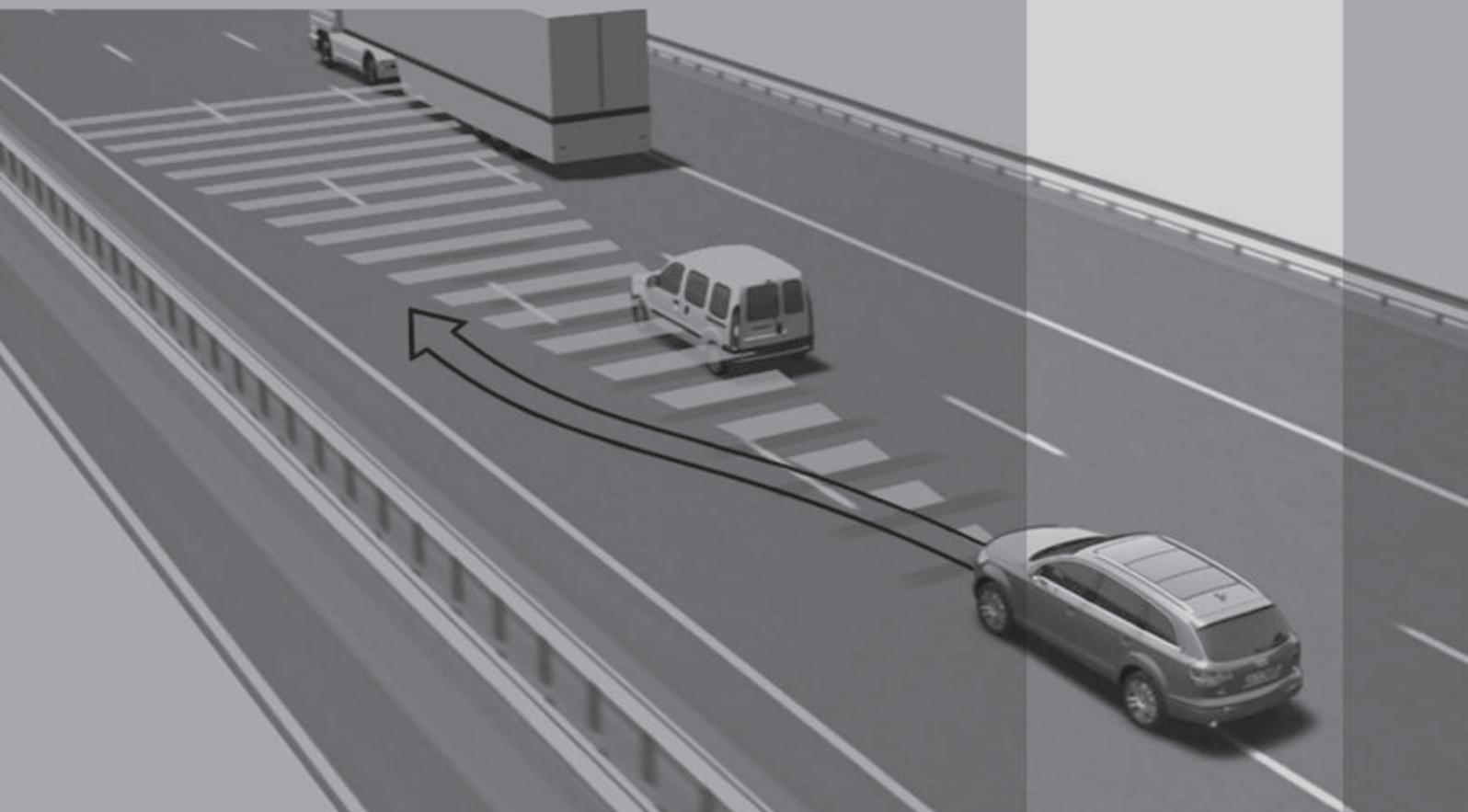


Audi Dissertationsreihe



# Vernetzung von Fahrerassistenzsystemen zur Verbesserung des Spurwechselverhaltens von ACC

Jörn Freyer



Universität der Bundeswehr München  
Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik  
Institut für Arbeitswissenschaft

Vernetzung von Fahrerassistenzsystemen zur Verbesserung des  
Spurwechselverhaltens von ACC

Dipl.-Ing. Jörn Freyer

Vollständiger Abdruck der bei der  
Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik  
der Universität der Bundeswehr München  
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

eingereichten Dissertation

Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. F. Svaricek
1. Berichterstatter:	Prof. Dr. B. Färber
2. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. M. Maurer

Diese Dissertation wurde am 20.02.2008 bei der Universität der Bundeswehr München, 85577 Neubiberg eingereicht und durch die Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik am 27.02.2008 angenommen.

Tag der Prüfung: 15.08.2008

### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2008  
Zugl.: München, Univ., Diss., 2008  
978-3-86727-710-5

Audi Dissertationsreihe, Band 9

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2008  
Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen  
Telefon: 0551-54724-0  
Telefax: 0551-54724-21  
[www.cuvillier.de](http://www.cuvillier.de)

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2008  
Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-86727-710-5

# Danksagung

Diese Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als Doktorand in der Abteilung Entwicklung Fahrerassistenzsysteme (I/EF-56) der Audi AG Ingolstadt, in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Arbeitswissenschaft (LRT-11) der Universität der Bundeswehr München.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Berthold Färber, der die Arbeit mit großem Interesse begleitete, mit viel Engagement förderte und jederzeit zu konstruktiven Diskussionen bereit war. Herrn Prof. Dr. Markus Maurer danke ich sehr herzlich, dass er diese Arbeit bei der Audi AG ermöglichte und unterstützte und über mehre Jahre mit wertvollem Rat zur Verfügung stand.

Für die gute Zusammenarbeit und viele hilfreiche Anregungen möchte ich mich bei allen Kollegen aus der Abteilung Entwicklung Fahrerassistenzsysteme (I/EF-56), den dazugehörigen Entwicklungspartnern, sowie den Mitarbeitern des Instituts für Arbeitswissenschaft der Universität der Bundeswehr München herzlich bedanken. Frau Prof. Dr. Barbara Deml und Herrn Christoph Blaschke schulde ich großen Dank für die Unterstützung bei den Fahrversuchen, für ihre fundierte Beratung in statistischen Fragen und für viele gemeinsame zielführende Diskussionen. Ein besonderes Dankeswort gilt allen Studenten, die in den verschiedenen Phasen dieser Arbeit, durch ihren großen Einsatz und ihr Engagement maßgeblich zum Gelingen beigetragen haben.

Großer Dank gebührt darüber hinaus meinen Kollegen Stefan Sandig, Sven Böhme und Waldemar Winter, die wie gute Geister beim Aufbau und der Betreuung des Versuchsfahrzeugs unterstützt und stets für gute Laune im Projekthaus „Fahrerassistenzsysteme“ gesorgt haben. Herrn Andreas Djermeister, der durch seinen unermüdlichen Einsatz stark zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat, danke ich für ausführliche Diskussionen und Unterstützung bei gemeinsamen Mess-/Pendelfahrten zwischen München und Ingolstadt. Bei Herrn Dr. Karl-Heinz Siedersberger und Herrn Thomas Bock möchte ich mich für wertvolle Anregungen und fundierten Empfehlungen in fachlichen Fragen, sowie für ihr großes Talent auch in schwierigen Zeiten für positive Stimmung zu sorgen, bedanken.

Frau Dr. Veronika Krapf und meinem Vater Dr. Jürgen Freyer gebührt großer Dank für viele hilfreiche Anregungen und die gründliche Durchsicht der Arbeit.

Meiner Frau Carolin, meiner Familie und allen Freunden danke ich für ihr Verständnis, den guten Zuspruch und die aktive Unterstützung, die diese Arbeit erst möglich gemacht haben.



**für Carolin und Hanna-Lena**



---

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	11
2	Theoretischer Teil - Vernetzung von FAS .....	13
2.1	Stand der Technik von Fahrerassistenzsystemen .....	14
2.1.1	Heutiger Entwicklungsprozess bei FAS .....	15
2.1.2	Eigenschaften heutiger FAS .....	16
2.1.3	Entwicklungstendenzen im Bereich FAS .....	17
2.2	Technische und ökonomische Gründe für die Vernetzung von FAS .....	19
2.3	Nutzerzentrierter Ansatz für die Vernetzung von FAS .....	20
2.4	Erweitert situationsadaptives ACC durch Vernetzung mit LKA und LCA .....	25
2.4.1	Untersuchungsgegenstand Situation Spurwechsel .....	25
2.4.2	Systemverhalten von ACC und Potential von LKA und LCA .....	26
2.4.2.1	Stand der Technik .....	26
2.4.2.2	Erschlossene Verbesserungspotentiale .....	28
2.5	Vorgehen der Arbeit .....	29
3	Fahrversuch zu Fahrerverhaltensänderungen durch ACC .....	30
3.1	Literaturüberblick zu Fahrerverhaltensänderungen mit ACC .....	30
3.2	Diskussion von Simulator- und Realfahrversuchen .....	32
3.3	Erwartete Fahrerverhaltensänderungen mit ACC .....	33
3.4	Aufbau des Fahrversuchs .....	34
3.4.1	Versuchsträger .....	35
3.4.2	Charakteristik der Probanden .....	37
3.4.3	Ablauf der Probandenstudie .....	37
3.5	Probandenzuordnung zu Fahrstilen .....	39
3.6	Fahrerverhaltensänderungen und Systemakzeptanz – subjektive Sicht .....	42
3.7	Fahrerverhaltensänderung – objektive Ergebnisse .....	45
3.7.1	Ergebnisse der Messdatenauswertung .....	47
3.7.1.1	Mittlere Fahrgeschwindigkeit .....	47
3.7.1.2	Spurwechselfrequenz .....	48
3.7.1.3	Ausscherabstand und Ausscherzeitlücke .....	49
3.7.1.4	Ausscherdifferenzgeschwindigkeit .....	50
3.7.1.5	Wechseldauer .....	50
3.7.1.6	Fahrspurwahl .....	51
3.7.1.7	Bremsungen $>1,5 \text{ m/s}^2$ .....	52

3.7.1.8	Spurwechselklassen.....	53
3.8	Korrelation von Fragebogen und Messdaten .....	57
4	Situationsadaptives, fahrerzentriertes ACC in Spurwechselsituationen .....	59
4.1	Bisherige Ansätze zur Spurwechselmodellierung.....	60
4.2	Anforderungen an die Sensorik vernetzter FAS .....	60
4.3	Situationsadaptives, fahrerzentriertes ACC – Funktion Spurwechselunterstützung	62
4.3.1	Peripheriemodule .....	64
4.3.2	Abschaltkriterien .....	66
4.3.3	Spurwechselmotivation .....	67
4.3.3.1	Motivation aus Vorderfahrzeug .....	68
4.3.3.1.1	Wunschgeschwindigkeit.....	69
4.3.3.1.2	Differenzgeschwindigkeit .....	70
4.3.3.1.3	Eintauchstärke und zeitlicher Abstand.....	72
4.3.3.1.4	Ableitung der Time to Collision.....	74
4.3.3.1.5	Annäherungskritikalitätsmaß .....	75
4.3.3.2	Motivation aus Einfädelsituation .....	76
4.3.4	Sichere Durchführbarkeit des Spurwechsels.....	79
4.3.4.1	Modellierung der Spurwechseltrajektorie .....	79
4.3.4.2	Analyse der Kritikalität umgebender Fahrzeuge.....	88
4.3.5	Spurwechselbeginn-Erkennung.....	98
4.3.5.1	Blinkerbetätigung .....	99
4.3.5.2	Quergeschwindigkeit.....	100
4.3.5.3	Time To Line Crossing .....	102
4.3.5.4	Kurvenbereinigter Lenkradwinkel .....	105
4.4	Bypassing des ACC-Systems .....	109
5	Fahrversuch zur Validierung des situationsadaptiven ACC/SWU-Systems..	111
5.1	Charakteristik der Probanden .....	111
5.2	Ablauf der Probandenstudie .....	112
5.3	Erwartete Änderungen im Fahrerverhalten und der Systemakzeptanz .....	113
5.4	Probandenzuordnung zu Fahrstilen .....	114
5.5	Fahrerverhaltensänderung und Akzeptanz – subjektive Sicht .....	114
5.6	Fahrerverhaltensänderungen – objektive Sicht .....	118
5.6.1.1	Mittlere Durchschnittsgeschwindigkeit.....	120
5.6.1.2	Spurwechselhäufigkeit .....	120
5.6.1.3	Ausscherabstand.....	121
5.6.1.4	Ausscherdifferenzgeschwindigkeit .....	122
5.6.1.5	Wechseldauer .....	123
5.6.1.6	Fahrspurwahl.....	123
5.6.1.7	Bremsungen > 1,5m/s <sup>2</sup> .....	124
5.6.1.8	Spurwechselklassen.....	125

5.7	Korrelation von Messdaten und Fragebogen .....	126
6	Unterschiede im Fahrverhalten zwischen beiden Fahrversuchen .....	128
6.1	Vergleichbarkeit der beiden Fahrstudien .....	128
6.2	Unterschiede in der subjektiven Wahrnehmung .....	131
6.3	Rückbildung von Fahrerverhaltensänderungen.....	133
6.4	Leistungsbewertung des ACC/SWU-Systems .....	136
6.5	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	140
7	Optimierungspotential durch Fuzzy Logic.....	142
7.1	Anwendung von Fuzzy Logic .....	143
7.1.1	Fuzzy Logic in der Spurwechselmotivation.....	144
7.1.1.1	Kriterien und Parametrierung.....	144
7.1.1.2	Regelbasis.....	146
7.1.2	Fuzzy Logic in der Spurwechselbeginn-Erkennung .....	147
7.1.2.1	Kriterien und Parametrierung.....	147
7.1.2.2	Regelbasis.....	148
7.2	Leistungsbewertung des Verbesserungspotentials durch Fuzzy Logic.....	150
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	153
Anhang.....		155
Anhang A:	Statistik .....	155
Anhang B:	Fuzzy Logic .....	158
Anhang C:	Dokumente aus den Fahrstudien.....	166
Anhang D:	Überblick zu verwendeten ACC-Studien .....	176
Abbildungsverzeichnis .....		179
Tabellenverzeichnis .....		183
Literaturverzeichnis .....		184

# Abkürzungsverzeichnis

<b>ACC</b>	Adaptive Cruise Control
<b>FAS</b>	Fahrerassistenzsysteme
<b>LKA</b>	Lane Keeping Assist
<b>LCA</b>	Lane Change Assist
<b>EU</b>	Europäische Union
<b>ABS</b>	Anti Blockier System
<b>ESP</b>	Elektronisches Stabilitätsprogramm
<b>TTC</b>	Time to Collision
<b>dTTC</b>	Ableitung der Time to Collision
<b>TO</b>	Target Objekt (Zielobjekt)
<b>PSD</b>	Prädiktive Streckendaten
<b>CMOS</b>	Complementary Metal Oxide Semiconductor
<b>ADTF</b>	Automotive Data and Time Triggered Framework
<b>MMI</b>	Mensch Maschine Interface
<b>CAN</b>	Control Area Network
<b>SWU</b>	Spurwechselunterstützung
<b>StVO</b>	Straßenverkehrsordnung
<b>KBA</b>	Kraftfahrzeugbundesamt
<b>Tn</b>	Zeitlücke
<b>SW</b>	Spurwechsel
<b>S-Linie</b>	Spurwechsellinie
<b>TLC</b>	Time to Line Crossing
<b>LRW</b>	(kurvenbereinigter) Lenkradwinkel
<b>EMMA</b>	Emulator for Measurement and Application
<b>POD</b>	Plug on Device
<b>KI</b>	Künstliche Intelligenz
<b>STD</b>	Standardabweichung

# 1 Einleitung

Die Europäische Union hat 2001 im Verkehrsweißbuch über die europäische Verkehrspolitik das ehrgeizige Ziel verabschiedet, eine Halbierung der Anzahl der Verkehrstoten bis 2010 zu erreichen [EU01]. In absoluten Zahlen bedeutet dies, dass 2010 im Gebiet der EU-Mitgliedstaaten von 2001 weniger als 20 000 Straßenverkehrstote zu beklagen wären. Diese Zielsetzung wurde von EU Ländern wie Schweden, Großbritannien oder den Niederlanden noch erweitert auf die Vision „Null-Verkehrstote“ (Vision Zero). Fakt ist heute leider, dass das Auto im direkten Vergleich bezogen auf die Fahrstrecke das unsicherste Verkehrsmittel von allen ist [Bubb 2002]. Besonders erschreckend wirkt die (zu) hohe Zahl von Verunglückten im Straßenverkehr, wenn man bedenkt, dass weltweit nahezu gleichviele Unfallopfer in der gesamten Luftfahrt in einem Jahr zu beklagen sind (888 Todesopfer im Jahr 2006, Quelle: [ASN]) wie in Bayern im selben Zeitraum Menschen Opfer eines tödlichen Unfalls im Straßenverkehr werden (911 Todesopfer im Jahr 2006, Quelle: [BStmI]). Um das ehrgeizige Ziel der massiven Unfallreduktion erreichen zu können, ist eine Vielzahl von Maßnahmen erforderlich. Ein Überblick möglicher Handlungsfelder zur Zielerreichung ist beispielsweise in [EU03-1] zu finden. Wichtig ist hierbei, dass nur eine Kombination aller Maßnahmen und deren Abstimmung aufeinander die hochgesteckten Ziele der Unfallreduktion erreichen lassen.

Den ersten Schwerpunkt bildet hierbei die Verbesserung der Fahrausbildung, z.B. durch integrierte Fahrsicherheitstrainings oder begleitetes Fahren ab dem 17. Lebensjahr. Hinzu kommen unterstützende gesetzliche Regelungen, wie z.B. eine 0,0 Promille Alkoholgrenze für Fahranfänger, der Führerschein auf Probe oder eine Verschärfung der Strafen bei Verkehrsdelikten. Auch gezielte Verkehrskontrollen an Gefahrenschwerpunkten, öffentliche Kampagnen, die die Verkehrssicherheit stärker in das Bewusstsein der Menschen bringen, und nicht zuletzt die Präsenz der Polizei im Straßenverkehr leisten einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung der Verkehrssicherheit. Neben der Polizei spielt auch das Rettungswesen eine zentrale Rolle für die Verkehrssicherheit. Flächendeckende Leitstellen, kürzere Anfahrtszeiten, mehr und besser ausgestattete Rettungsfahrzeuge und eine Verbesserung der Ausbildung der Rettungsassistenten können maßgeblich zu einer Reduktion von Unfalltoten beitragen. Daneben bieten sich dem Straßenbauwesen viele Möglichkeiten, Unfallschwerpunkte zu entschärfen und eine adäquate Streckenführung zu garantieren. Hierzu zählen Maßnahmen zur Verbesserung der Übersichtlichkeit und der Eindeutigkeit, wie die sichere Gestaltung von Kurven oder Kreuzungen bzw. das Aufstellen von Gebots- und Verbotsschildern, wenn eine Umgestaltung von Straßen, beispielsweise bei alten Alleen, nicht oder nur schwer möglich ist. Als Maxime im Straßenbauwesen muss gelten, dass eine Straße nicht gefährlicher sein darf als sie den Anschein gibt.

Neben diesen Maßnahmen, die der Öffentlichen Hand zur Verfügung stehen, trägt auch die Automobilindustrie hohe Verantwortung zur stetigen Weiterentwicklung der Fahrzeugsicherheit. In den vergangenen 30 Jahren hat eine Reihe von Maßnahmen der passiven Sicherheit zu einer deutlichen Verbesserung der Verkehrssicherheit geführt. Unter passiver Sicherheit werden Maßnahmen zusammengefasst, die im Falle eines Unfalls die

Folgen für den Fahrer reduzieren. Neben der stetigen Erhöhung der Steifigkeit der Fahrgastzelle und dem damit verbesserten Knautschverhalten hat insbesondere die Einführung des Sicherheitsgurts in Verbindung mit der Gurtpflicht eine deutliche Absenkung der Zahl von Verkehrstoten bewirkt. Weitere Maßnahmen der passiven Sicherheit sind die steigende Zahl lebensrettender Airbags oder die Einführung aktiver Gurtstraffer sowie Weiterentwicklungen für einen besseren Schutz von Fußgängern in Unfallsituationen.

Neben diesen Maßnahmen der passiven Sicherheit haben in der letzten Zeit verstärkt Innovationen der aktiven Sicherheit Einzug ins Fahrzeug gehalten. Unter aktiver Sicherheit werden alle Maßnahmen zusammengefasst, die zur Vermeidung von Unfällen beitragen. Prominenteste Beispiele hierfür sind ABS- und ESP-Systeme, die den Fahrer in fahrdynamisch kritischen Situationen durch eine Stabilisierung des Fahrzeugs unterstützen. In Kombination mit verbesserten Fahrwerken konnte so die Zahl von Schleuderunfällen nachhaltig gesenkt werden. Daneben tragen die verbesserte Ergonomie und Gestaltung der Fahrzeugbedienung sowie Komfortsysteme wie das Navigationssystem dazu bei, dass der Fahrer erforderliche Informationen einfacher aufnehmen kann und es zu weniger Blickabwendungen und Ablenkungen kommt. In jüngster Zeit sind Systeme entwickelt worden, die den Fahrer im Straßenverkehr bei der Bahnführung und bei Interaktionen mit umgebenden Fahrzeugen unterstützen. Verfügbar sind hier Systeme zur Gefahrenwarnung seitlich neben dem Fahrzeug und im Rückraum beim Spurwechsel oder auch Assistenzsysteme, die vor unbeabsichtigtem Verlassen der Fahrspur warnen. Daneben wurden Systeme, die die Wahrnehmung des Menschen unterstützen wie Infrarot-Nachtsichtsysteme (Night Vision) eingeführt. Mit Adaptive Cruise Control (ACC), im deutschsprachigen Raum auch unter Abstandregeltempomat bekannt, und ergänzenden Bremsassistentenfunktionen sind darüber hinaus Systeme verfügbar, die den Fahrer bei der Abstands- und Geschwindigkeitshaltung wirkungsvoll unterstützen. Rechtzeitige Warnungen und Eingriffe moderner Fahrerassistenzsysteme (FAS) tragen somit dazu bei, dass Unfälle noch vor ihrem Entstehen vermieden werden können (vgl. [EU03]).

Zusammenfassend ist zu sagen, dass weitere Verbesserungen für die Verkehrssicherheit insbesondere von der Weiterentwicklung der Fahrerassistenzsysteme zu erwarten sind. Gleichzeitig ist die Fahrerassistenz ein noch vergleichsweise junges Arbeitsfeld, so dass eine Vielzahl von offenen Fragen, insbesondere bezüglich der richtigen Gestaltung oder der Verkopplung dieser Systeme und ihres Einflusses auf das Fahrerverhalten zu klären sind.

Hierzu möchte die vorliegende Arbeit einen Beitrag leisten. Der hier vorgestellte Ansatz zur Vernetzung des Assistenzsystems ACC mit anderen Assistenzsystemen strebt die Schaffung eines situationsadaptiven und nutzerzentrierten Gesamtsystems an. Hierdurch wird es möglich, den Fahrer entsprechend seiner Erwartungen und passend zur jeweiligen Verkehrssituation wirkungsvoll zu unterstützen, um damit die Interaktionen zwischen Mensch und System nachhaltig zu verbessern und die Sicherheit für den Fahrer zu steigern.

## 2 Theoretischer Teil - Vernetzung von FAS

Zum besseren Verständnis der Systemfunktionalitäten werden zunächst die Assistenzsysteme ACC, LCA und LKA kurz definiert (vgl. Kap.2.1). Anschließend wird der heute gängige Entwicklungsprozess von Fahrerassistenzsystemen vorgestellt (Kap. 2.1.1), da direkt daraus eine Vielzahl von Eigenschaften heutiger FAS folgt. Bisher stellen autarke unvernetzte Einzelsysteme, die in speziellen Einzelsituationen unterstützen, den Stand der Technik dar (vgl. Kap. 2.1.2). Darüber hinaus werden Forschungs- und Entwicklungstendenzen im Themenfeld FAS vorgestellt. Deutlich kristallisieren sich dabei zwei Hauptströmungen heraus, für die öffentlich geförderte Projekte im Bereich Fahrerassistenzsysteme als Indikator herangezogen werden: zum einen das (teil)-autonome Fahren, welches das Ziel verfolgt, den Fahrer komplett von der Fahraufgabe zu befreien und zum anderen die Forschungsrichtung, bei der der Fahrer situativ und nutzernah unterstützt werden soll. Bei beiden Ansätzen muss vorrangig die Frage gelöst werden, wie viel und welche Automatisierung für den Fahrer den Idealzustand darstellen (vgl. Kap. 2.1.3).

Als eine wirkungsvolle Lösungsmöglichkeit, eine verträgliche Automatisierung für den Fahrer zu erreichen, wird das Prinzip der Vernetzung vorgestellt. Im ersten Schritt erfolgt ein Transfer dieses in Wirtschaft, Politik und Technik zurzeit sehr erfolgreichen Trends auf den Bereich Fahrerassistenzsysteme aufgrund von betriebswirtschaftlichen und kombinatorischen Aspekten (vgl. Kap. 2.2). Zum zweiten folgt die Forderung nach Vernetzung der Fahrerassistenzsysteme direkt aus dem Anspruch, ein nutzerzentriertes, situationsadaptives FAS schaffen zu wollen (vgl. Kap. 2.3). Die Analyse des menschlichen (Fahr)-Verhaltens, das geprägt ist durch komplexe vernetzte Wahrnehmungs-, Entscheidungs- und Handlungsmuster bildet hierfür die Grundlage. Insbesondere im Straßenverkehr dominiert ein Denken in komplexen Verkehrssituationen und eine Bearbeitung einer Vielzahl von vernetzten Teilaufgaben. Insbesondere der Umgang mit Risiko und Nichtlinearitäten in Wahrnehmungs- und Entscheidungsprozessen sowie die ganzheitliche Denkweise unterscheiden den Menschen heute wesentlich von verfügbaren Fahrerassistenzsystemen.

In Kapitel 2.4 erfolgt eine bewusste Einschränkung des Ansatzes auf die komplexe Fahrsituation Spurwechsel, da in dieser Situation vom Menschen eine Vielzahl von vernetzten Einzelentscheidungen getroffen werden muss. In dieser Verkehrssituation bietet der neue vernetzte, fahrerzentrierte Ansatz besonders großes Potential, da hier heute ein großes Ungleichgewicht zwischen der normalen Fahrerhandlung und der Reaktion des ACC-Systems vorliegt. Der Überblick über das aktuelle Systemverhalten des ACC-Systems in Spurwechselsituationen (Kap. 2.4.2.1) und das in dieser Arbeit genutzte Potential der Vernetzung mit anderen Systemen (Kap. 2.4.2.2) in der Situation Spurwechsel vervollständigen dieses Kapitel. Abgeschlossen wird der theoretische Teil mit einem Überblick über den Aufbau dieser Arbeit.

## 2.1 Stand der Technik von Fahrerassistenzsystemen

Einen guten Überblick über den Stand der Technik von FAS geben [Bishop 2005], [Maurer & Stiller 2005] oder [Schindler 2007]. Im Folgenden werden die Fahrerassistenzsysteme Adaptive Cruise Control (ACC), Lane Keeping Assist (LKA) und Lane Change Assist (LCA), die im Mittelpunkt dieser Arbeit stehen, kurz definiert.

### **Adaptive Cruise Control (ACC)**

Das Adaptive Cruise Control (ACC) System ist die konsequente Weiterentwicklung der Tempomatfunktion auch „Cruise Control“ genannt. ACC umfasst neben der Regelung der aktuellen Fahrgeschwindigkeit auf die vom Fahrer eingestellte Wunschgeschwindigkeit (Free Mode) eine Abstandsregelung, d.h. der Fahrer wählt über die ACC-Einstellungen einen zeitlichen Abstand in Form der Sollzeitlücke aus, der vom System eingehalten werden soll. Wird über den 77 GHz Radarsensor ein relevantes Fahrzeug vor dem eigenen Fahrzeug detektiert, leitet ACC selbstständig die erforderliche Verzögerung ein (Follow Mode). Der Wechsel zwischen den beiden Hauptfunktionen Abstands- und Geschwindigkeitsregelung erfolgt automatisch durch das System. Inbegriffen ist hierbei der automatische Wechsel des Zielobjekts vor dem eigenen Fahrzeug, wie er beispielsweise bei einem einscherenen Fahrzeug erforderlich wird. Zur Regelung der Längsdynamik des Fahrzeugs stehen ACC sowohl die Ansteuerung der Bremse als auch die Nutzung des Motorschleppmoments und die Ansteuerung der Drosselklappe zur Verfügung. Durch die internationale Norm für ACC Systeme [ISO 15622: 2002] ist die maximal nutzbare Verzögerung auf  $3 \text{ m/s}^2$  begrenzt. Eine detaillierte Beschreibung der ACC Funktion kann z.B. bei [Bosch 2002] nachgelesen werden.

### **Lane Change Assist (LCA)**

Der Spurwechsellassistent (LCA) ist nach Definition der Norm [ISO 17387: 2006] ein System, das den Fahrer in Spurwechselsituationen vor potentiell gefährdenden, gleichgerichteten Fahrzeugen im Bereich seitlich und hinter dem Fahrzeug warnt. Hierbei wird die Art der Unterstützung so gewählt, dass dem Fahrer der Blick in den Rückspiegel nicht abgenommen werden soll, sondern eine zusätzliche Information bereitgestellt wird. Die ISO-Norm teilt die Spurwechsellassistentensysteme in drei Klassen ein:

Typ 1 überwacht nur die Totwinkelbereiche seitlich des Ego-Fahrzeugs (Blind Spot Warning)

Typ 2 warnt vor herannahenden Fahrzeugen auf der Zielspur (Closing Vehicle Warning)

Typ 3 ist die Kombination der ersten beiden Systeme (Lane Change Warning).

Bei dem in dieser Arbeit eingesetzten System handelt es sich um eines der dritten Art. Zur Detektion der relevanten umgebenden Fahrzeuge werden zwei Short-Range-Radarsensoren eingesetzt. Die Mensch-Maschine-Schnittstelle ist über ein zweistufiges Warn- und Anzeigekonzept in den Außenspiegeln realisiert. Bei der ersten Eskalationsstufe befindet sich

ein relevantes Fahrzeug auf der Zielspur, ohne dass der Fahrer durch den Blinker einen Spurwechselwunsch angezeigt hat. Hierbei erfolgt eine Warnung durch gedimmt leuchtende Leuchtdioden. Setzt der Fahrer in dieser Situation noch den Blinker und kündigt damit einen bevorstehenden Spurwechselwunsch an, erfolgt eine Akutwarnung mit blinkenden Leuchtdioden in den Seitenspiegeln (vgl. [Popken 2006]).

### **Lane Keeping Assist (LKA)**

Nach der Norm [ISO 17361: 2007] besteht die Aufgabe von LKA-Systemen, im deutschsprachigen Raum auch als Spurhalteassistent bekannt, darin, den Fahrer bei der Spurhaltung auf Autobahnen oder autobahnähnlichen Straßen zu unterstützen. Hierbei warnt das System vor einem unbeabsichtigten Verlassen der Fahrspur beispielsweise durch Unachtsamkeit des Fahrers. Ein Setzen des Blinkers und die damit verbundene Ankündigung eines Spurwechsels deaktivieren das LKA-System kurzzeitig. Als Warnmodalität werden häufig Vibrationen im Lenkrad, im Fahrersitz oder gerichtete Lenkmomente eingesetzt. Als Sensor wird eine Kamera mit Bildverarbeitung zur Detektion der Spurmarkierungen verwendet. Ein Vergleich zwischen dem aus den Kameradaten ermittelten Soll-Kurs und dem real gefahrenen Ist-Kurs des Fahrzeugs bildet die Grundlage für die Warnentscheidung. Nach der Norm sind LKA-Systeme nicht dafür vorgesehen, vor Kollisionen mit anderen Fahrzeugen zu warnen oder die Fahrzeugbewegungen zu kontrollieren.

## **2.1.1 Heutiger Entwicklungsprozess bei FAS**

Aufbauend auf der Analyse von Unfallzahlen oder zur Steigerung des Komforts des Fahrers werden aktuell Fahrerassistenzsysteme entwickelt. Beste Beispiele hierfür sind die oben definierten FAS. Üblicherweise wird hierbei eine Schwäche im menschlichen Wahrnehmungs- oder Entscheidungsprozess im Themenfeld Sicherheit bzw. ein vorliegender Diskomfort für den Fahrer identifiziert. Unmittelbar daraus resultiert die gängige Einteilung in Sicherheits- und Komfortsysteme, wobei fließende Grenzen zwischen diesen Kategorien existieren. Häufig erfolgt seitens der Produkthaftung diese Einteilung eines Systems in die Klasse der Komfortsysteme, obwohl eine Steigerung der Sicherheit zu erwarten ist, um die Haftbarkeit im Fehlerfall des Systems zu begrenzen. Aber auch klassische Komfortsysteme, wie z.B. eine Klimaanlage, tragen durch eine Steigerung des Komforts zu einer Verbesserung der Fahrerkondition bei, womit direkt eine Stärkung der Vigilanz in kritischen Fahrsituationen einhergeht. Eine weitere gängige Unterteilung der Fahrerassistenzsysteme erfolgt nach der Art des Eingriffs und der Warnmodalität. In der Vergangenheit wurden vor allem informierende bzw. warnende Fahrerassistenzsysteme wie Night Vision, LKA oder LCA im Automobilmarkt eingeführt. Daneben haben auch Systeme mit aktivem Eingriff wie ACC, Heading Control oder Bremsassistenzsysteme Einzug gehalten.

Alle hier genannten Systeme haben gemeinsam, dass sie unabhängig von einander für eine spezifische Unterstützungssituation entwickelt wurden. Der Trend, FAS in Form von „Standalone“-Einzelfunktionen zu entwickeln, hat neben Vorteilen wie einer getrennten Vermarktung oder einer spezifischen kostengünstigen Umfeldsensorik auch gravierende

Nachteile. Der größte daraus entstehende Konflikt ist, dass diese durch die Entwicklungs- und Produktionsweise vorgegebene Trennung in Systeme zur Unterstützung der Längs- und Querverführung dem natürlichen Fahren widerspricht. Nach [Apel 1998] denkt der Mensch in Situationen und erlebt die Längs- und Querverführung als eine Einheit. Die Leistungsfähigkeit zur parallelen Bewältigung von Längs- und Querverführung beschreibt Apel in Analogie zum Kammschen Kreis aus der Fahrdynamik (vgl. [Apel 1998]). Dieses Modell beruht darauf, dass sich für ein Fahrmanöver die maximal mögliche Gesamtbeschleunigung aus der Linearkombination von Quer- und Längsdynamik zusammensetzt. Erfordert also z.B. die Längsdynamik in einer Situation eine hohe zu übertragene Beschleunigung, kann gleichzeitig in der Querdynamik nur noch eine geringe Beschleunigung zur Verfügung gestellt werden. Übertragen auf Fahrerassistenzsysteme muss also gelten, dass die Unterstützung bei der Längs- und Querverführung sich sinnvoll ergänzen muss, damit die resultierende Assistenz für den Fahrer am wirkungsvollsten ist.

Ein wichtiger Grund, warum heutige FAS sehr spezifisch nur auf Teile der Fahraufgabe ausgerichtet sind und nicht ganzheitlich wirken, liegt in der Umfeldsensorik. Erneut führt die Denkweise „eine Funktion – ein System – ein Sensor“ zu leistungsfähigen, aber sehr spezifischen Einzelsensoren. Ansätze zu einer integrierten Sensor-Daten-Fusion und damit einer gemeinsamen Situationsrepräsentation befinden sich noch in der Vorentwicklung (vgl. z.B. [Weiss & Kirchner 2004]). Daneben bestehen auf der Interpretationsebene deutliche Defizite zwischen der hochkomplexen, menschlichen Wahrnehmung und Entscheidung und der abstrakten, stark vereinfachten Situationsinterpretation durch moderne Fahrerassistenzsysteme.

Neben der Sensorik prägen auch die Systemgrenzen eines FAS und dessen Verhalten an den selbigen maßgeblich den Entwicklungsprozess von FAS. Die heutige Forderung an ein System lautet üblicherweise, dass dieses in mehreren für das FAS unterschiedlichen, vom Fahrer aber als identisch wahrgenommenen Fahrsituationen ein reproduzierbares Verhalten zeigen soll. Schnell entsteht so ein Konflikt in der Erwartungshaltung des Kunden und der Forderung nach Transparenz an den Systemgrenzen.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass der aktuelle Entwicklungsprozess unter den heutigen Rahmenbedingungen zu leistungsfähigen, eigenständigen, aber für den Nutzer oft wenig intuitiven Einzelsystemen führt. Daneben wird eine wirksame Integration der einzelnen Fahrerassistenzsysteme durch unterschiedliche Reifegrade der Systeme erschwert und aktuell besteht noch kein durchgängiges Gesamtkonzept, das die Fahrerassistenz als Ganzes geeignet abbildet.

### **2.1.2 Eigenschaften heutiger FAS**

Direkt aus dem heute üblichen Entwicklungsprozess bei Fahrerassistenzsystemen resultieren die charakteristischen Eigenschaften heutiger Systeme. Die meisten FAS sind geprägt durch ein maschinelles, reproduzierbares Verhalten nach eindeutig definierten Handlungsmustern. Eine situationsadaptive oder taktische Reaktion erfolgt nicht. Die Systemreaktionen ergeben sich unmittelbar aus einer Konstellation von Zustandsgrößen. Die Schaffung einer konsistenten Situationsrepräsentation ist auf Grund der unabhängigen Systeme mit

eingeschränkter, nicht vernetzter Sensorik nur bedingt möglich. Somit fehlt eine ganzheitliche Betrachtung der Verkehrssituation bei heutigen FAS.

Basis der Systemreaktion sind mathematische, physikalische Gleichungssysteme, die bei gleichem Ergebnis reproduzierbar ein identisches Systemverhalten auslösen. Eine konsequente Absichtserkennung des Fahrers erfolgt nicht. Innerhalb dieses Modells werden Linearisierungen und stetige Fortsetzungen angenommen, die in einigen Bereichen dem menschlichen nichtlinearen Wahrnehmen, Entscheiden und Handeln nicht gerecht werden. Individuelle Wünsche oder Vorlieben des Fahrers bzw. fahrstilspezifische Eigenheiten werden durch die Auslegung der Systeme nach einem Normalfahrer häufig nur eingeschränkt abgedeckt. Um hier eine Verbesserung zu erreichen, sind in vielen FAS manuelle Einstellmöglichkeiten vorgesehen, wie bei ACC die Verstellbarkeit der Zeitlücke oder des Fahrprogramms. Hierdurch soll es für den Fahrer möglich werden, das Systemverhalten in Grenzen an sein Normalverhalten anzupassen. Daneben ermöglichen diese Verstellmöglichkeiten auch eine Anpassung des Systemverhaltens an geänderte Umgebungsbedingungen wie z.B. das Wetter oder die Verkehrsdichte. Ein weiteres Manko heutiger Fahrerassistenzsysteme ist, dass die aktuelle Fahreraufmerksamkeit und die direkte Fahrerabsicht heute kaum bis gar nicht geschätzt bzw. prädiziert wird. Hieraus folgen unmittelbar Konflikte in der Interaktion zwischen Fahrer und System, da die Erwartungshaltung des Fahrers an das System nicht befriedigt werden kann. Eine sinkende Akzeptanz und häufig negative Verhaltensänderungen sind die Folge. Im schlechtesten Fall hat der Fahrer das Gefühl, dass er gegen das System arbeitet und schaltet dieses ab.

Zusammenfassend wird deutlich, dass heutige Fahrerassistenzsysteme meist eigenständige Einzelsysteme sind, die auf einer für eine Einzelfunktion präzisen, aber für eine Betrachtung der Gesamtsituation lückenhaften Sensorik aufbauen. Ein situationsadaptives, fahrerähnliches durchgängiges Systemverhalten ist nur eingeschränkt zu finden.

### **2.1.3 Entwicklungstendenzen im Bereich FAS**

Die exakte Zielsetzung innerhalb der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen ist zurzeit uneinheitlich. Ist sich die Fachwelt zwar bei den übergeordneten Zielen Steigerung der Sicherheit (Vision Zero) und des Komforts (Autopilot) einig, gehen die Meinungen, wie diese Ziele mittel- und langfristig erreicht werden können, deutlich auseinander. Betrachtet man öffentlich geförderte Projekte als Indikator, in welche Richtung die Entwicklung geht, so existieren wiederum zwei Strömungen. Zum einen werden Assistenzsysteme gefordert und gefördert, die den Fahrer situativ unterstützen, ein kooperatives Handeln bezogen auf den umgebenden Verkehr und ein nutzernahes Verhalten zeigen. Beispiele hierfür sind Projekte wie [INVENT], [AKTIV], [AIDE]. Zum anderen existieren starke Strömungen, die sich eine Autopiloten-Funktion, also eine autonome Fahrzeugführung für Straßenfahrzeuge, wünschen. Beispiele sind Projekte wie [GRAND CHALLENGE], [URBAN CHALLENGE] VaMP & VaMoRs<sup>1</sup>. Gemeinsam ist diesen beiden Forschungsschwerpunkten die Frage, wie viel und

---

<sup>1</sup> Eine ausführliche Beschreibung der Projekte VaMP und VaMoRs ist z.B. bei [Maurer 2000] oder [Siedersberger 2003] zu finden.

welche Automatisierung verträgt der Fahrer eines Kraftfahrzeugs im heutigen Verkehr. Schnell drängen sich Parallelen aus der nutzergerechten Automatisierung von Arbeitsplätzen in Kernkraftwerken oder bei Piloten auf. Auch hier standen Sicherheits- und Komfortsteigerungen im Fokus der Bemühungen.

Ein Vergleich mit der Luftfahrt scheint hierbei, da es sich auch um eine Steuerungs- und Regelungsaufgabe handelt, am nahe liegenden. Doch deutlich andere Rahmenbedingungen, wie hochtrainierte Piloten, andere „Verkehrsszenarien“, eine geringere Anzahl direkter Interaktionspartner oder auch eine stärkere Präsenz und Einbindung von externen Überwachungseinrichtungen (Flugsicherung), machen eine direkte Übertragbarkeit unmöglich. Als Transfer oder zum Zweck der Sensibilisierung für potentiell entstehende Problemstellungen sind die hier gemachten, teils schmerzhaften Erfahrungen trotzdem von großer Wichtigkeit. Die Erfahrungen mit der Automatisierung bei Piloten und bei Sicherheitsfachleuten in Kernkraftwerken hat [Bainbridge 1983] unter dem Begriff „Ironies of Automation“ prägnant beschrieben. Die folgenden Ausführungen stützen sich auf diese Arbeit und sollen die Risiken der Automatisierung im Straßenverkehr beleuchten (vgl. auch [Sträter 2001]). Ein zu hoher Grad der Automatisierung bringt hierbei drei Hauptprobleme mit sich, die die Leistungsfähigkeit des Verbundes Mensch - System deutlich absenken:

Erstens führt eine hohe Automatisierung dazu, dass der Fahrer weniger Aufgaben übernehmen muss. Hieraus folgt ein geringerer Übungsgrad, der direkt zu einer Verschlechterung der motorischen und kognitiven Fertigkeiten führt. Hinzu kommt, dass der Zugriff auf das vorhandene Wissen erschwert und wenig neues Wissen zu einer effektiven Problemlösung und Entscheidung erworben wird.

Zum zweiten führen lange fehlerfreie Phasen des Systems dazu, dass sich die Fahraufgabe von einem aktiven Handeln hin zu einer Kontroll- und Überwachungstätigkeit (Monitoring) verändert. Hieraus folgen häufig Vigilanzprobleme, die die Leistungsfähigkeit der Fahrer stark absenken.

Zum dritten treten Schwierigkeiten in der Prozesskontrolle bei hoch automatisierten Systemen auf. Insbesondere bei Übernahmeszenarien muss der Fahrer in kurzer Zeit von seiner Monitoring-Aufgabe zu einer aktiven Handlung finden. Dies erfordert die Fähigkeit, sich schnell in die Situation hineinzudenken. Erschwert wird dies, wenn der Entscheidungs- und Handlungsprozess des Systems im Aufbau nicht dem natürlichen Entscheidungsprozess des Menschen entspricht, sondern auf einer für den Menschen nicht oder nur schwer nachvollziehbaren abstrakten Ebene abläuft.

Abschließend sei zu diesen drei Gefahren der Automatisierung noch gesagt, dass diese nicht isoliert von einander zu betrachten sind, sondern dass insbesondere Selbstverstärkungs- oder Kompensationseffekte untereinander mitberücksichtigt werden müssen.

Dieser kurze Exkurs sollte hierbei zeigen, dass bei der Erhöhung der Automatisierung zur Steigerung von Komfort und Sicherheit Risiken und Probleme zu erwarten sind. Ansätze zur Vernetzung einzelner Systeme zu einem Gesamtsystem erhöhen wunschgemäß den Grad der Automatisierung und sollen zu einer höheren Verfügbarkeit der Einzelsysteme an den Systemgrenzen führen. Für die Systemgestaltung und Funktionsdefinition dieser vernetzten Fahrerassistenzsysteme muss darauf geachtet werden, dass die Handlungen des Systems vom

Fahrer nachvollziehbar sein müssen, damit entstehende Übernahme-situationen bewältigt werden können. Ideal ist daneben, wenn der Entscheidungsprozess des Systems in den relevanten Variablen mit dem des Menschen weitestgehend übereinstimmt, so dass resultierende Reaktionen des Systems mit den Erwartungen des Menschen übereinstimmen. Des Weiteren muss bei der Systemausprägung beachtet werden, dass die motorischen und kognitiven Fertigkeiten des Fahrers erhalten bleiben. Vigilanzprobleme sind in der in dieser Arbeit im Zentrum stehenden Spurwechselsituation, aufgrund der hohen Komplexität der Fahrsituation und der damit erforderlichen Aufmerksamkeit, weniger zu erwarten. Im Folgenden werden nun zwei Ansätze vorgestellt, die aus verschiedenen Blickwinkeln eine Vernetzung heute verfügbarer Fahrerassistenzsysteme fordern, um Fahrer zukünftig wirkungsvoll unterstützen zu können.

## **2.2 Technische und ökonomische Gründe für die Vernetzung von FAS**

Die Vernetzung als Methode zur Verbesserung von Fahrerassistenzsystemen auszuwählen liegt nahe, wenn man verschiedene Lebensbereiche des Menschen betrachtet, in denen diese Entwicklung deutlich zu erkennen ist. Aus der Wirtschaftspolitik ist hier in allererster Linie die Globalisierung zu nennen. Auch in der Technik hat sich die Vernetzung als Technologie (vgl. das Internet) massiv durchgesetzt. Die Vorteile sind hierbei, dass für jeden einzelnen Menschen die Verfügbarkeit, der Austausch und die Übertragung von Information erheblich vereinfacht worden sind. Daneben ermöglicht eine konsequente Vernetzung im Idealfall, dass die individuellen Stärken des Einzelnen für die Gesamtheit aller teilnehmenden Interaktionspartner verfügbar werden. Dadurch, dass in großen, vernetzten Systemen notwendige Informationen häufig mehrfach zur Verfügung stehen, sinkt die Anfälligkeit für Systemausfälle durch die redundante Informationsverfügbarkeit.

In der Realität aber sind stark vernetzte Systeme leider häufig auch hochkomplex in ihren Systemzuständen und ihrem Systemverhalten. Trotzdem liegt es nahe, diese Methode der Vernetzung auch für Fahrerassistenzsysteme anzuwenden. So wird allgemein ein Nutzen für den Fahrer erwartet, wenn Fahrerassistenzsysteme wie ACC, LKA oder LCA gemeinsam und vernetzt agieren. Unmittelbar können so auf funktionaler Ebene Verbesserungen durch eine gemeinsame konsistente Situationsrepräsentation entstehen (vgl. [Freyer & Maurer 2006]). Heutige Funktionsgrenzen der Einzelsysteme können aufgelöst oder transparenter gestaltet werden, was eine intuitive Nutzung durch den Fahrer direkt begünstigt. Erste Schritte, insbesondere im Bereich der Warnstrategien eine Vernetzung herbeizuführen, sind z.B. bei [Färber & Färber 2004] oder [Willner & Meurle 2005] zu finden. Hier werden die Vorteile einer situations- und belastungsgerechten Informationsversorgung des Fahrers durch Assistenz- und Informationssysteme aufgezeigt, die unmittelbar zu einer Reduzierung des Fahrerworkloads oder einer Verbesserung der Transparenz des Systems führen.

Daneben wird in Forschung und Entwicklung seit langem an Sensordatenfusionen gearbeitet (z.B. [Stüker 2003]) oder [Weiss & Kirchner 2004]). Das Ziel ist hierbei, Redundanzen und Überdeckungsbereiche zwischen verschiedenen Sensoren zu nutzen und komplementäre

Sensoren zu integrieren, um ein ganzheitliches Abbild der Realität für zukünftige Fahrerassistenzsysteme zu schaffen. Nur so werden neue sicherheitskritische Funktionen, wie z.B. eine automatische Notbremse zur Kollisionsvermeidung, die eine sehr stabile und sichere Umfeldwahrnehmung erfordern, serientauglich darstellbar.

Neben diesen technischen Aspekten gibt es gute betriebswirtschaftliche Gründe für eine Vernetzung. Direkt erkennbar ist, dass eine Paketierung, wie sie fast zwangsläufig aus einer konsequenten Vernetzung folgt, zu deutlichen Kosteneinsparungen führen wird. Zum einen können die Variantenvielfalt und die damit verbundenen Verwaltungs- und Logistikkosten reduziert werden. Zum anderen wird dieser Weg schneller zu einer Entwicklung weg von der Zusatzausstattung hin zur Serienausstattung von Fahrerassistenzsystemen im Fahrzeug führen. Dies ist neben den damit verbundenen ökonomischen Effekten (Kostensenkungen durch Stückzahleffekte) auch wegen der positiven Effekte für die Verkehrssicherheit deutlich zu befürworten (vgl. [Freyer & Maurer 2006]). Zusammenfassend ist zu sagen, dass der in vielen Lebensbereichen etablierte Prozess der Vernetzung sich aus technischen und betriebswirtschaftlichen Überlegungen sehr gut auch für Fahrerassistenzsysteme eignet.

## **2.3 Nutzerzentrierter Ansatz für die Vernetzung von FAS**

Zielsetzung des nutzerzentrierten Ansatzes ist, ein Fahrerassistenzsystem zu entwickeln, das sich situationsadaptiv und nutzerzentriert verhält. Insbesondere soll es möglich werden, Fahrerhandlungen qualitativ und quantitativ beschreiben zu können und damit eine stabile und sichere Prädiktion der Fahrerabsicht möglich zu machen. Dies wird am Beispiel der Vernetzung der Fahrerassistenzsysteme ACC, LKA und LCA gezeigt, mit der Zielsetzung das Assistenzsystem ACC in seiner Funktionalität zu verbessern. Probanden haben wiederholt den Wunsch geäußert, ein ACC-System nutzen zu können, das sich wie ein Mensch verhält (vgl. [Grashey 1999]). Um das ACC in seinem Systemverhalten zu verbessern, muss im ersten Schritt das menschliche Verhalten analysiert werden. Im Folgenden werden Grundlagen zur Fahrermodellierung im speziellen, wie die menschliche Wahrnehmung und Entscheidung des Fahrers erfolgt, analysiert und für den Transfer in das situationsadaptive nutzerzentrierte Konzept aufbereitet. Alle im Folgenden dargestellten Ideen und Konzepte beleuchten das Wissensgebiet jedoch nicht vollständig. Vielmehr wurde eine Auswahl mit Blick auf die Anwendung getroffen.

Aufgabe der Fahrermodelle in FAS ist es, ein Verhalten zu ermöglichen, das den Handlungen des Menschen in der gegebenen Fahrsituation entspricht. Erste Ansätze, kognitive Prozesse des Fahrers zu modellieren, können unter dem Begriff „humane Assistenz“ zusammengefasst werden (vgl. [Vollrath et al. 2005]). Daneben existieren Bemühungen, Fahrerhandlungen stärker im situativen Kontext zu betrachten (vgl. [Fastenmeier 1995]). Beide Ansätze fließen in den in dieser Arbeit geschaffenen, nutzerzentrierten und situationsadaptiven Vernetzungsansatz ein. Grundlage für eine jede Fahrerhandlung ist im ersten Schritt die Informationsaufnahme und die nachfolgende Verarbeitung. Die Informationsaufnahme ist beim Menschen gekennzeichnet durch eine multimodale Wahrnehmung. Im Straßenverkehr nutzt der Fahrer hauptsächlich die Sinne Gesichtssinn, Gehörsinn, Gleichgewichtssinn, Beschleunigungssinn und Tastsinn zur Erfassung der relevanten Informationen. Diese

einfachen Grundinformationen werden zu einer konsistenten internen Repräsentation des Fahrzeugs und der Umwelt zusammengefügt. Wichtig ist hierbei, dass eine Information nur zum Fahrer durchdringt, wenn diese eine Reizwahrnehmungsschwelle übersteigt. Neben diesen Erkennungsschwellen ist der Mensch auch eingeschränkt in seiner Wahrnehmung von Veränderungen bzw. Differenzen in der Information. Weiterführende Grundlagen zur Reizwahrnehmung sind in der Psychophysik zu finden. Heruntergebrochen auf die Fahrzeugführung liefert [Schreiner 1999] einen detaillierten Überblick. Unmittelbar aus diesen Erkenntnissen zur menschlichen Wahrnehmung folgt, dass diese nicht-linearen Zusammenhängen unterliegt. Bekannt ist, dass der Mensch seine Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung in lateraler und longitudinaler Richtung wahrnehmen kann. Bei der Schätzung der Eigengeschwindigkeit werden neben dem Tacho auch noch Fahrgeräusche sowie das kinästhetische und optische Empfinden miteinbezogen [Bubb 1977]. Zustandsgrößen wie die Geschwindigkeit von Fremdfahrzeugen oder die Beschleunigung werden vom Menschen nicht direkt, sondern über Hilfsgrößen wie die Time to Collision (TTC) geschätzt (vgl. [Färber 1986]). Das Auflösungsvermögen bedingt, dass die Unterschiede 'eben merklich' (vgl. [Fechner 1860]) sein müssen. Modellansätze zur Nachbildung der Abstands- und Geschwindigkeitsschätzung sind z.B. bei [Wiedemann 1974] oder [Leutzenbach 1966]) zu finden. Problematisch sind starke, oft auch systematische Schätzfehler und eine hohe Varianz, wie sie [Tresilian 1991] bei der TTC feststellen konnte. Bemerkenswert war hierbei, dass die vom Fahrer geschätzte TTC nur 60% der realen TTC betrug, diese also deutlich unterschätzt wurde. Auf weitere Besonderheiten der menschlichen Wahrnehmung und wie diese Effekte im Fahrermodell in dieser Arbeit abgebildet worden sind, wird in den Kapiteln zur Spurwechselmotivation (Kap. 4.3.3) und der Bewertung der Kritikalität (Kap. 4.3.4) näher eingegangen.

Neben dieser Nichtlinearität der menschlichen Wahrnehmung beeinflussen die Umweltfaktoren die Informationsaufnahme und das menschliche Handeln. Nach [Schreiner 1999] ergibt sich die Verkehrssituation aus der Summe der Umweltfaktoren. Sie werden unterschieden in Fahrraum, andere Verkehrsteilnehmer und Beschilderung. Nach [von Garrel 2003] definieren diese Einflussfaktoren die objektive Situation. Erst durch die subjektive Interpretation der Situation werden adäquate Handlungsmuster bzw. Handlungsalternativen vom Fahrer abgeleitet. Hierbei unterliegen alle Entscheidungsprozesse des Fahrers auch dem Fahrstil und dem aktuellen Fahrerzustand. Daneben beeinflusst das Fahrzeug und dessen Eigenschaften, wie z.B. die Dynamik beim Beschleunigen, die Fahrerhandlungen. Der Fahrerzustand wird in diesem Kontext vielfältig verwendet und fasst vereinfacht Attribute wie die aktuelle Belastung, Aufmerksamkeit oder Kondition des Fahrers zusammen. Diese individuellen Unterschiede können direkt zu verschiedenen Zielsetzungen und Vorgehensweisen in einer objektiv identischen Fahrsituation führen (vgl. [Grashey 1999]). Zur Modellierung des menschlichen Verhaltens im Straßenverkehr existiert eine Vielzahl von Beschreibungsmodellen. Ein gängiger Ansatz ist hierbei das Drei-Ebenen-Modell nach [Rasmussen 1983], das von [Donges 1992] speziell für die Fahrsituation weiterentwickelt worden ist. Hierin wird unterschieden zwischen einem fertigkeitbasiertem, regelbasiertem und wissensbasiertem Verhalten (vgl. Bild 2.1).

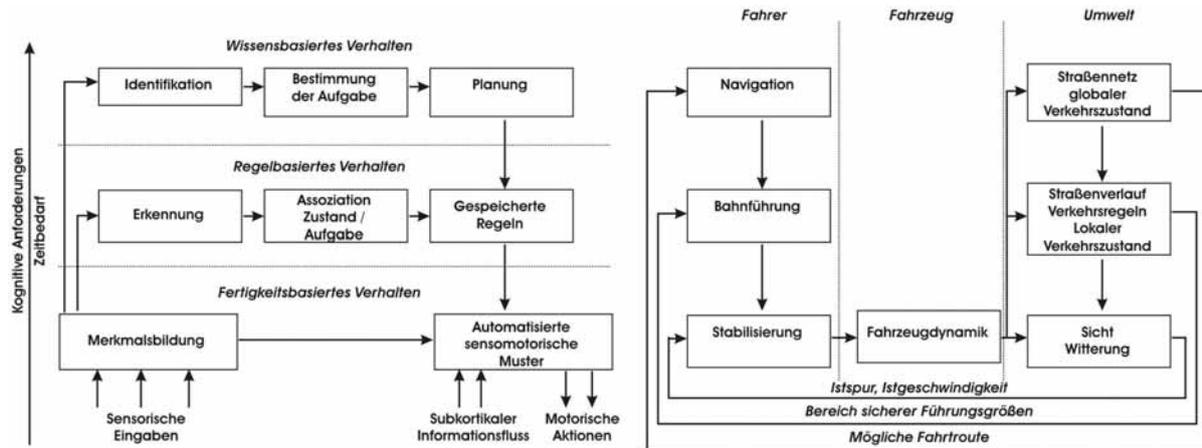


Bild 2.1: Ebenen des menschlichen Handelns nach [Rasmussen 1983] und zugeordnete Bereiche der Fahrzeugführungsaufgabe nach [Donges 1992]

Unter fertigkeitsbasiertem Verhalten werden Verhaltensweisen zusammengefasst, die auf stark automatisierte, sensomotorische Muster zurückgehen und Folge eines langen Lernprozesses sind. Diese unterlagerten Steuerungs- und Regelungsprozesse laufen unterhalb der willentlichen Aufmerksamkeit ab. Eine bewusste kausale Verknüpfung nimmt der Fahrer hier üblicherweise nicht vor, sondern er zeigt gezielt trainierte Verhaltensmuster.

Unter regelbasiertem Verhalten wird verstanden, dass der Fahrer bereits erworbenes, vertrautes Wissen und Fähigkeiten wirkungsvoll auf die aktuelle Situation anwendet. Hierfür wird auf hinterlegte implizite Wenn-dann-Regeln zurückgegriffen. Das wissensbasierte Handeln lässt sich vom fertigkeitsbasierten Handeln dadurch abgrenzen, dass die Anwendung dieser Regeln gezielt und kognitiv bewusst abläuft.

Unter wissensbasiertem Verhalten sind Verhaltensweisen zusammengefasst, in denen in einer nicht vertrauten Situation aufgrund einer bewussten Analyse Entscheidungen getroffen und Handlungen abgeleitet werden. Das auf dieser dritten Ebene meist angewendete Entscheidungsschema ist die Analyse mit welcher Handlungsalternative das überlagerte Ziel am besten erreicht werden kann. Hierbei handelt es sich um kognitiv stark fordernde Prozesse, für die verglichen mit den anderen beiden Ebenen der höchste Zeitbedarf besteht. In Bild 2.1 sind die verschiedenen Ebenen nach [Rasmussen 1983] dargestellt und die korrespondierenden Fahraufgaben nach [Donges 1992] zugeordnet.

Im Straßenverkehr hat der Fahrer häufig Entscheidungen zwischen verschiedenen Handlungsalternativen, wie z.B. Überholen oder Folgefahrt, zu treffen. Nach [Schreiner 1999] laufen die dazu notwendigen Prozesse bei der Entscheidung im Straßenverkehr auf der wissensbasierten und der regelbasierten Ebene ab. In der Analyse des Entscheidungsverhaltens wird generell zwischen dynamischen und statischen Entscheidungen differenziert (vgl. [Kraiss 1985]), wobei im zeitkritischen Verkehrsgeschehen zum überwiegenden Teil dynamische, teilweise riskante Entscheidungen vom Fahrer getroffen werden müssen. Gängige Beschreibungsformen von Entscheidungsprozessen sind die Entscheidungsmatrix oder der Entscheidungsbaum. Ein Überblick über Entscheidungsprozesse im Kontext Fahrerverhalten ist bei [Juergensohn 1997] zu finden. In der Literatur haben sich zur Beschreibung von Entscheidungs- und Wahrnehmungsprozessen und dem

Umgang mit Risiko im Straßenverkehr verschiedene Ansätze etabliert (vgl. Überblick [Simon 2005]). Herauszuheben sind hierbei die „risk homeostasis theory“ [Wilde 1994], die „zero risk theory“ nach [Näätänen & Summala 1974] und die „threat-avoidance theory“ nach [Fuller 1984]. Alle diese Theorien zur Risikoakzeptanz des Fahrers verbindet, dass der Fahrer abhängig von der aktuellen Fahrsituation ein spezifisches Risiko in Kauf nimmt. Nach [Wilde 1994] passt der Fahrer sein Fahrverhalten an, wenn das aktuelle Risiko das akzeptierte Risiko überschreitet. Hieraus folgt ausgelöst durch FAS eine Risikohomöostase beim Fahrer. Mit dem Wissen, dass das FAS die Sicherheit erhöht, passt der Fahrer sein akzeptiertes Risiko an und kompensiert somit den potentiellen Sicherheitsgewinn. Dieser Modellvorstellung widerspricht die „zero risk theory“ nach [Näätänen & Summala 1974], die auf der Annahme basiert, dass der Fahrer kein Risiko akzeptiert und sein Fahrverhalten so anpasst, dass das subjektiv kalkulierte Risiko in jeder Verkehrssituation gleich Null ist. Beiden Theorien steht die Modellvorstellung der „threat avoidance theory“ entgegen (vgl. [Fuller 1984]). Hierin wird normalen Fahrern die Fähigkeit abgesprochen, ein (Unfall)-Risiko objektiv kalkulieren zu können. Der zentrale Begriff dieser Theorie ist deshalb der subjektiv geprägte Begriff Bedrohung („threat“). In seiner Modellvorstellung hat der Fahrer Handlungsweisen erlernt, die situativ angewendet werden, um eine antizipierte Bedrohung zu vermeiden.

Im nutzerzentrierten, situationsadaptiven Fahrermodell dieser Arbeit sind die Bewertung des objektiven und die Abschätzung des subjektiven Risikos des Fahrers in einer Verkehrssituation von zentraler Bedeutung. Das objektive Risiko wird über physikalische Zusammenhänge und geeignete Kennzahlen erfasst. Die Beschreibung des subjektiven Risikos erfolgt durch die Auswertung des Fahrverhaltens von Probanden in den verschiedenen Spurwechselsituationen. Die Maxime lautet hierbei, dass eine fehlerhafte „Unterstützung“ durch das System für den Fahrer zwar zu einem gestiegenen Diskomfort führen darf, dass aber eine Erhöhung des Risikos bzw. der Bedrohung hieraus nicht folgen darf. Durch Miteinbeziehung sowohl der situativen Komponente als auch der Abbildung menschlicher nicht-linearer Wahrnehmungs- und Entscheidungsprozesse sowie durch eine objektive und subjektive Bewertung des Risikos grenzt sich dieses Fahrermodell von den in der Literatur verfügbaren Modellen ab.

Ein ausführlicher Überblick über in der Literatur verfügbare Fahrermodelle und die notwendigen psychologischen und naturwissenschaftlichen Grundlagen ist bei [Juergensohn 1997] zu finden. Daneben werden hier folgende typische Einsatzgebiete von Fahrermodellen genannt:

- Verbesserung der objektiven Bewertung durch immer gleichbleibende Handlungen (z.B. Modellierung eines virtuellen Testfahrers („Handlingmonitor“) [Meyer-Tuve & Heissing 2007])
- Schaffung von Modellen zur makroskopischen, realistischen Simulation des Verkehrsflusses (z.B. Simulationsumgebung PELOPS vgl. z.B. [Breuer & Christen 2002])
- Nachbildung umgebender Verkehrsteilnehmer für die Fahrsimulationen zur Modellierung von Interaktionsprozessen (z.B. [Ehmanns 2002])

- Erstellung von Lastkollektiven für Verschleiß, Emission (z.B. [Neunzig & Benmimoun 2002])
- Verbesserung von Fahrerassistenzsystemen (z.B. [Freyer et al. 2007])
- Verkehrssicherheitsforschung zur Analyse von komplexen Unfallsituationen und der Ableitung von Maßnahmen zur Sicherheitssteigerung (vgl. [Färber 1987]).

Unabhängig vom Einsatzgebiet haben die meisten Fahrermodelle eine ähnliche Struktur. An einen Anteil Identifikation und Interpretation zur Bildung der spezifischen Situationsrepräsentation schließt sich ein Entscheidungsmodul an, aus dem sich Regelungs- oder Handlungsstrategien ableiten. Die Hauptprobleme von so aufgebauten Modellen entstehen nach [Schreiner 1999] beim Übergang von einer Situation zur nächsten. Insbesondere für komplexe Fahrmanöver wie dem Spurwechsel, bei dem sich Längs- und Querführung stark vom normalen Fahren unterscheiden und sich die Fahraufgabe dynamisch ändert, erreichen heutige Fahrermodelle häufig ihre Grenzen. Deshalb findet man in der Literatur meistens Fahrermodelle, die entweder „nur“ für den Bereich der Querführung oder der Längsführung erstellt worden sind. Auf diese vielfältigen Fahrermodelle zur Beschreibung des Folgeverhaltens oder der Spurhaltung wird hier nicht näher eingegangen. Eine gute Übersicht liefern für die Längsführung die Arbeiten von [Ahmed 1999] oder [von Garrel 2003] und für die Querführung die Arbeiten von [Schreiner 1999] [Juergensohn 1997] oder [Salvucci 2005].

Im Folgenden werden Fahrermodelle zur Beschreibung des Verhaltens in der Fahrsituation Spurwechsel vorgestellt. Diese Modelle beschreiben häufig jedoch nur einen Teil des gesamten Handels, z.B. nur die Motivation für einen Spurwechsel und werden zur Abgrenzung zum eigenen Fahrermodell in Kap. 4, wieder aufgegriffen und detailliert beleuchtet. [Gipps 1986] stellt ein Modell vor, bei dem der Fahrer nach einem festen Entscheidungsbaum sich für oder gegen einen Spurwechsel als Handlungsalternative entscheidet. Zur Beschreibung des Spurwechselwunsches auf Basis von Motivationsinflüssen, wie z.B. der eigenen Wunschgeschwindigkeit oder der Differenzgeschwindigkeit zum Vorderfahrzeug, existieren viele verschiedene Arbeiten (vgl. [Kopf 1993], [Sparmann 1978], [Irmischer 2001] oder [Fastenmeier et al. 2001]). Erweiterungen dieser motivationsbasierten Modelle um die Komponente des taktischen Verhaltens aufgrund von Interaktionseffekten mit umgebenden Fahrzeugen zeigen [Ehmanns 2002] oder [Ahmed 1999] in ihren Arbeiten. Einen weiteren wahrscheinlichkeitsbasierten Ansatz stellen [Dagli & Reichardt 2002] vor. Sie ermitteln als Entscheidungsgrundlage für oder gegen einen Spurwechsel eine Gesamtwahrscheinlichkeit aus der Linearkombination der Einzelwahrscheinlichkeiten der Handlungsalternativen in der Fahrsituation. Bei [Rekersbrink 1994] wird ein Fahrermodell vorgestellt, in dem mit Hilfe der Time-to-Collision (TTC) und der zeitlichen Ableitung sowohl der Spurwechselwunsch als auch die Sicherheitsbewertung der Verkehrssituation modelliert wird. Ein weiteres Fahrermodell zur Beschreibung der Kritikalität zu den umgebenden Fahrzeugen im Verlauf eines Spurwechsels ist bei [Hashimoto et al. 2000] zu finden. [Toledo et al. 2003] differenziert in seinem Fahrermodell insbesondere beim Spurwechselwunsch und den zumutbaren Beeinflussungen umgebender Fahrzeuge zwischen

erforderlichen (mandatory) (z.B. durch Wegfall einer Fahrspur) und wünschenswerten (discretionary) (z.B. durch Überholwunsch verursachten) Spurwechseln. Neben diesen Modellen, die den Spurwechselwunsch und die Kritikalität der entstehenden Verkehrssituation im Fahrermodell abbilden, existieren aus der Unfallrekonstruktion eine Vielzahl von Beschreibungsformen der Spurwechseltrajektorie (vgl. [Olsen et al. 2002], [Runkel 1969], [Weiss 1988], [Spindler 1962], [Sporrer et al. 1998], [Burg & Rau 1981]).

Zusammenfassend ist zu sagen, dass viele in der Literatur verfügbaren Fahrermodelle für Spurwechselsituationen häufig nur einen kleinen Teil des Spurwechselvorgangs abbilden. Insbesondere die verschiedenen Handlungsalternativen in der Übergangsphase zwischen einer Annäherungssituation und der Spurwechselhandlung werden durch diese Ansätze nur unzureichend beschrieben. Daneben fehlt vielen Modellen eine differenzierte Analyse des Fahrstils und des Einflusses spezifischer, situativer Aspekte. Die nichtlineare menschliche Wahrnehmung und die Vielzahl von Einflussfaktoren auf die Entscheidung werden durch die häufig sehr analytischen, stochastischen Beschreibungsformen nur unzureichend abgebildet.

Ein neues hier vorgestelltes kognitives Fahrermodell, aufgebaut auf der Analyse von Realfahrten und modelliert mit Methoden der künstlichen Intelligenz wie der Fuzzy-Logik, kann diese Lücke schließen. Ausführlich wird dieses Modell in Kap. 4 vorgestellt.

## **2.4 Erweitert situationsadaptives ACC durch Vernetzung mit LKA und LCA**

Um die Wirksamkeit des situationsadaptiven, fahrerzentrierten Ansatzes deutlich zu machen, wurde die Situation Spurwechsel ausgewählt, da diese besonders bei dichtem Verkehr oder bei Ein/Ausfädelvorgängen an Ein/Ausfahrten sehr hohe Anforderungen an den Fahrer stellt [Obojski et al. 2000]. Daneben macht die hohe Zahl von Spurwechselunfällen deutlich, dass hier noch Unterstützungsbedarf durch FAS über die heute gängigen Systeme LCA und LKA hinaus besteht.

### **2.4.1 Untersuchungsgegenstand Situation Spurwechsel**

Die Situation Spurwechsel auf Autobahnen oder autobahnähnlichen Straßen stellt für LCA und LKA eine zentrale Fahrsituation dar. Soll das LCA-System dem Fahrer eine zusätzliche Information über eine Gefährdung durch den umgebenden Verkehr geben, so besteht die Aufgabe des LKA-Systems darin, zwischen einem bewussten und einem unbewussten Verlassen der Fahrspur zu unterscheiden. Damit beide Systeme aktiv werden, muss also ein Spurwechsel detektiert bzw. ausgeschlossen werden. Daneben stellt die Situation Spurwechsel für heutige ACC-Systeme eine Grenzsituation dar. Denn „menschliche“ Fahrer zeigen in Annäherungssituationen mit Spurwechsel ein deutlich verändertes Verhalten als in Annäherungssituationen ohne Spurwechsel. So werden im Verlauf der Annäherungsphase der Abstand zum Vorderfahrzeug kurzfristig unterschritten und der Spurwechsel häufig mit konstanter Geschwindigkeit oder leichtem Beschleunigen begonnen [Saad & Villame 1996]. Der menschliche Fahrer führt also kurzfristig und dynamisch eine situationsadaptive

Umpriorisierung durch, weg vom Ziel „Wunschabstand halten“, hin zum Ziel „Wunschgeschwindigkeit halten“ (vgl. [Harms & Tönross 2004]).

Heutige ACC-Systeme reagieren dagegen in diesen Situationen, bei gleichen Zustandsgrößen relativ zum Vorderfahrzeug immer identisch. Das heißt konkret, dass das ACC System in diesen Situationen zu früh eine Bremsung einleitet. Somit entsteht ein Konflikt zwischen der Erwartungshaltung des Fahrers und den Systemreaktionen, wobei sinkende Akzeptanz (vgl. [Tricot 2004 et al.], [Simon 2005], [Schindler 2007]) und Anpassungsvorgänge im Fahrverhalten zu erwarten sind. Dass die Nutzung moderner FAS generell zu Verhaltensänderungen des Fahrers führt, bestätigen viele Experten (vgl. [Färber & Färber 2003], [Buld & Krüger 2002], [Weinberger 2001], [Winner & Luh 2007]).

Allerdings lässt sich häufig nur schwer voraussagen, in welche Richtung sich das Fahrerverhalten entwickelt und ob die Verkehrssicherheit dadurch verbessert oder verschlechtert wird (vgl. [Nilson et al. 2002], [Grayson 1996]). Dieses Fazit belegen auch die zahlreichen in Kapitel 3.1 analysierten Untersuchungen zu Verhaltensänderungen durch ACC, die häufig zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen kommen. Um diesen Verhaltensänderungen entgegenwirken und die Akzeptanz des ACC Systems seitens des Fahrers steigern zu können, wird der vernetzte, situationsadaptive, fahrerzentrierte Ansatz für ACC in Spurwechselsituationen umgesetzt.

## **2.4.2 Systemverhalten von ACC und Potential von LKA und LCA**

Im Folgenden wird das Verhalten eines Serien-ACC-Systems und das Potential durch Vernetzung mit den Systemen LKA und LCA für die Situation Spurwechsel dargestellt.

### **2.4.2.1 Stand der Technik**

Ein heute gängiges ACC-System baut seine Situationsrepräsentation auf Objekten und der Zuordnung dieser zu einem Fahrschlauch auf. Relevant für die Regelung ist immer nur das Objekt vor dem Ego-Fahrzeug, das Target Objekt (TO). Weitere Objekte gehen in die Regelung üblicherweise nicht ein. Das heißt, die Reglerreaktion des ACC-Systems baut nicht auf einer ganzheitlichen, komplexen Verkehrssituationsbetrachtung auf, sondern erfolgt direkt auf Basis der Zustandsgrößen in longitudinaler Richtung des Zielobjekts. Grundlage heutiger ACC-Systeme ist also ein auf das Ego-Fahrzeug und dessen Trajektorie fokussierter Ansatz. Die beiden konkurrierenden Ziele „Wunschgeschwindigkeit halten/erreichen“ und „Wunschabstand halten/erreichen“ können im Allgemeinen nicht gleichzeitig erfüllt werden. Um ein sicheres und stabiles Systemverhalten garantieren zu können, wird bei einem auftretenden Zielkonflikt immer das Ziel „Wunschabstand einhalten“ gegenüber dem Ziel „Wunschgeschwindigkeit halten“ priorisiert. Dauerhaft wird zu allen Zeiten ein objektives Maß für die Kritikalität zum Vorderfahrzeug berechnet. Ist eine Annäherungssituation nicht mehr in den Grenzen des ACC-Systems ausregelbar, so erfolgt eine Fahrerübernahmeaufforderung in Form eines akustischen und optischen Signals. Zusammenfassend zeigt sich schon in relativ einfachen Situationen, wie einer Annäherung oder einer Folgefahrt, dass im ACC-System eine Abstraktion der Situation durchgeführt wird. Nötig wird dieser stark reduzierende, heuristische Ansatz in heutigen ACC-Systemen, um die

komplexe Fahrsituation so zu vereinfachen, dass eine handhabbare, technisch implementierbare und juristisch vertretbare Systemreaktion erreicht werden kann (vgl. [Schindler 2007]).

Damit ein ACC-System ein akzeptables Gesamtverhalten zeigen kann, sind insbesondere die Übergänge zwischen verschiedenen Situationen, in denen sich das Verhalten in longitudinaler Richtung schnell ändert, von großer Wichtigkeit. Konkret sind dies Übergangssituationen zwischen Freifahrt und Annäherung. Erfolgt der Übergang in der Form, dass das Fremdfahrzeug den Fahrschlauch verlässt, zeigt ACC ein einfaches, aber effizientes regelbasiertes Verhalten. Das Ziel, die Wunschgeschwindigkeit zu erreichen, wird durch eine angeforderte Längsbeschleunigung erreicht. Diese ist abhängig von der aktuellen Fahrgeschwindigkeit, der Differenz zur Wunschgeschwindigkeit und vom Fahrer einstellbaren Dynamikparametern.

Erfolgt der Übergang zu einer veränderten Situation durch einen Spurwechsel des eigenen Fahrzeugs, ist im heutigen ACC nur eine rudimentäre Überholhilfe hinterlegt. Hierbei wird das Setzen des Blinkers immer als Indikator für eine Ausschersituation gewertet. Der interne Prozess zur Deplausibilisierung des Zielobjekts, mit dem die Übergangszeit von Folge- auf Freifahrt minimiert werden soll, wird dann angestoßen. Nicht berücksichtigt wird die erhebliche Zahl aller Spurwechselmanöver ohne Betätigung des Fahrtrichtungsanzeigers, d.h. ein direktes Spurwechselmodell ist nicht vorhanden.

In der heutigen Konfiguration hat ein ACC-System aufgrund seiner durch die Sensorik eingeschränkten Situationsrepräsentation nicht die Möglichkeit, in den Übergangssituationen eine situationsadaptive, nutzerzentrierte Assistenz zu bieten. Insbesondere fehlen Informationen über den nachfolgenden Verkehr, über Fahrspuren, Straßenverhältnisse oder die Fahrroute. Im Folgenden wird kurz aufgezeigt, welchen Beitrag die Fahrerassistenzsysteme LKA, LCA sowie das Navigationssystem zur Verbesserung der Situationsrepräsentation leisten können.

Durch die Vernetzung mit LKA stehen dem ACC-System unmittelbar Informationen über die Geometrie der Fahrspuren zur Verfügung. Hierdurch kann eine bessere Bestimmung der eigenen Position relativ zum Bezugssystem Straße erfolgen. Eine eindeutige Zuordnung des eigenen Fahrzeugs zu einer Spur und die Verfügbarkeit einer weiter links liegenden Überholspur sind so gegeben. Außerdem können auch umgebende Fahrzeuge im Nahbereich eindeutig Fahrspuren zugeordnet werden. Daneben steht über die Spurmarkierungsart die implizite Information über ein Überholverbot (durchgezogene Linie) zur Verfügung. Ein expliziter Spurwechselwunsch unabhängig vom Blinkersignal ist aus dem LKA-System nicht ableitbar, allerdings kann ein Verlassen der eigenen Fahrspur eindeutig identifiziert werden. Insgesamt erfolgt eine Verbesserung der Situationsrepräsentation durch die Möglichkeit einer relativen Positionierung zur Straße.

Durch die Vernetzung mit dem LCA stehen dem ACC-System wichtige Informationen über rückwärtige Fahrzeuge zur Verfügung. Erneut kann durch Nutzung der Daten des LKA eine exakte Spurzuordnung der hinteren und seitlichen Fahrzeuge vorgenommen werden. In Kombination mit den Objekten vor dem Fahrzeug durch das ACC-System ist eine Situationsrepräsentation in Form von Verkehrssituationen möglich. Aussagen über die

Kritikalität zu allen umgebenden Fahrzeugen in komplexen Fahrsituationen werden möglich. Eine direkte Modellierung einer Spurwechselabsicht ist im heutigen LCA nicht hinterlegt, da auch hier der Blinker als einziger Indikator für einen somit „zufälligen“ Spurwechsel gewertet wird.

Durch die Erweiterung der Vernetzung um die prädiktiven Streckendaten (PSD) des Navigationssystems stehen dem ACC-System überdies Informationen über die aktuelle Strecke und die geplante Fahrtroute zur Verfügung. Hierdurch kann die Situationsrepräsentation um die Navigationsebene erweitert und die Vorausschau auf den Fernbereich ausgedehnt werden.

#### **2.4.2.2 Erschlossene Verbesserungspotentiale**

Im Folgenden wird das Verbesserungspotential für ACC durch die Vernetzung mit den Systemen LCA, LKA und PSD vorgestellt, das mit der neu entwickelten Spurwechselunterstützungsfunktion (vgl. Kap. 4) zu erreichen ist. Durch eine verbesserte Situationsrepräsentation soll eine an die Verkehrssituation angepasste Reglerreaktion möglich werden. Insbesondere in Annäherungssituationen soll so eine zuverlässige Vorhersage getroffen werden, ob ein Spurwechsel wahrscheinlich ist oder nicht. Die komplexe Situation Spurwechsel kann hierbei in die Teilaufgaben Wahrnehmung, Entscheidung und resultierende Aktionen unterteilt werden. Abhängig von der Überholmöglichkeit soll der Regelungsbeginn des ACC-Systems situationsadaptiv angepasst werden. Somit erfolgt in Spurwechselsituationen ein Eintauchen über den normalen Folgeabstand hinaus. Unerwünschte Bremsungen innerhalb der Annäherung sollen vermieden werden. Ist eine Spurwechselabsicht durch die Analyse der Verkehrssituation sehr unwahrscheinlich, soll bei Annäherungen früher als bisher eine ACC-Verzögerung eingeleitet werden. Die somit erforderliche maximale Bremsverzögerung kann geringer ausfallen, der Komfort in Annäherungssituationen steigt. Der bestehende Kompromiss, die beiden Zustände, Annäherung mit und ohne Spurwechselwahrscheinlichkeit, mit nur einer Parametrierung abdecken zu müssen, soll so aufgelöst werden. Innerhalb des prädizierten Spurwechselverhaltens müssen auch taktische Entscheidungen des Fahrers, beispielsweise das Durchlassen eines schnellen Hinterfahrzeugs auf der Zielspur vor dem Beginn eines eigenen Spurwechsels, durch die vernetzte Situationsbeschreibung berücksichtigt werden. Es soll somit möglich werden, dass das ACC-Verhalten nicht mehr nur vom unmittelbar vorausfahrenden Fahrzeug abhängt, sondern dass alle umgebenden und beeinflussenden oder beeinflussten Fahrzeuge in die ACC-Regelung miteinbezogen werden.

In Einfädelsituationen, in denen ein kooperatives Fahrverhalten an Einmündungen und Auffahrten üblich ist, soll dieses über ein Einfädelmodell im ACC hinterlegt werden. In diesen Situationen soll nicht mehr nur auf das direkte Zielobjekt vor dem Fahrzeug durch ACC reagiert werden, sondern es werden Fahrzeuge auf der Nachbarspur mit Einfädelabsicht in den Entscheidungsprozess miteinbezogen. In allen Spurwechselsituationen soll es ferner möglich sein, unabhängig vom Blinkersignal einen Spurwechsel vorauszusagen. Grundlage hierfür ist ein im ACC explizit hinterlegtes Spurwechselmodell. Dadurch soll unabhängig vom Setzen des Blinkers durch den Fahrer eine schnellere Deplausibilisierung des Zielobjekts oder ein früheres Beschleunigen durch das ACC aktiviert werden.

Eindeutig ist allerdings auch, dass nicht nur ACC von der Vernetzung mit LCA und LKA profitiert, sondern umgekehrt diese Systeme auch von ACC. Beispielsweise kann bei Fahrzeugen in unmittelbarer Nähe zum Egofahrzeug (durch ACC detektiert), der Eingriffszeitpunkt und die Warnintensität eines LKA-Systems modifiziert werden. Durch das Erkennen eines Überholwunsches aus den Objektdaten des ACC-Systems unabhängig von der Blinkerbetätigung wird es für ein LCA-System möglich in allen gefährlichen Spurwechselsituationen wirkungsvoll zu warnen, auch wenn diese nicht explizit vom Fahrer mit dem Blinker eingeleitet worden sind.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf dem eingreifenden ACC-System, da hier die Verbesserungen direkt Einfluss auf das Regelverhalten haben und somit in Alltagssituationen vom Kunden wahrgenommen werden können.

## **2.5 Vorgehen der Arbeit**

Aufgrund der theoretischen Überlegungen und der Definition der angewendeten Vernetzung von Fahrerassistenzsystemen werden zunächst in einem Realfahrversuch mit und ohne Serien-ACC die Systemakzeptanz und Fahrerverhaltensänderungen analysiert (Kapitel 3).

Im vierten Kapitel wird das neue, ganzheitliche Fahrermodell für Spurwechselsituationen vorgestellt. Dieses Modell baut auf einer ausführlichen Analyse des normalen Fahrverhaltens in Spurwechselsituationen auf. Die Entscheidungs- und Handlungsprozesse und die Risikoeinschätzung des Systems orientieren sich an denen des Menschen soweit diese bekannt sind und beinhalten alle Phasen eines Spurwechsels. Dieses Fahrermodell wird in ein ACC-System implementiert, so dass ein nutzerzentriertes, situationsadaptives Regelverhalten in Spurwechselsituationen erreicht wird. Im fünften und sechsten Kapitel wird die Wirksamkeit dieses vernetzten, situationsadaptiven, nutzerzentrierten Ansatzes in einer neuen vergleichbaren Fahrstudie durch die Rückbildung von Verhaltensauffälligkeiten und die Steigerung der Systemakzeptanz nachgewiesen. Gleichzeitig wird noch Optimierungspotential in diesem Ansatz bei der Nachbildung unscharfer Wahrnehmungs- und Entscheidungsprozesse identifiziert. Hierauf basiert die im siebten Kapitel beschriebene Weiterentwicklung des numerischen, deterministischen Fahrermodells mit den Methoden der Fuzzy-Logik. Der Nachweis in Form der Leistungsbewertung über die Wirksamkeit und das Potential dieses Ansatzes schließen dieses Kapitel ab. Im letzten Kapitel werden die Ergebnisse noch einmal zusammengefasst und ein Ausblick auf weitere Entwicklungsfelder gegeben.

## **3 Fahrversuch zu Fahrerhaltensänderungen durch ACC**

Der Fahrversuch wurde im Jahr 2005 durchgeführt mit der Zielsetzung, Erkenntnisse über die Veränderung des Fahrerhaltens unter dem Einfluss von ACC in Spurwechselsituationen zu gewinnen. Im Mittelpunkt der Untersuchungen stehen hierbei Adaptionsprozesse im Verhalten des Fahrers, die durch ein im Markt befindliches Serien-ACC ausgelöst werden. Ein Überblick über bereits publizierte Fahrversuche in denen Fahrerhaltensänderungen durch ACC untersucht wurden, wird in Kap. 3.1 vorgestellt. In den folgenden Abschnitten werden dann die eingesetzte Versuchsmethodik, der Versuchsträger, das Training der Probanden im Umgang mit ACC sowie die Rahmenbedingungen der Probandenstudie vorgestellt. Die Aufbereitung der Ergebnisse aus dem Fragebogen und der Messdatenauswertung schließen dieses Kapitel ab.

### **3.1 Literaturüberblick zu Fahrerhaltensänderungen mit ACC**

Fahrerhaltensänderungen durch die Nutzung von ACC sind in einer Vielzahl von Studien untersucht worden. Hierbei wurden häufig Ergebnisse von Fahrten mit und ohne ACC miteinander verglichen, um Änderungen des Fahrerhaltens nachzuweisen. Vor allem wurden in diesem Kontext die Wahl der Fahrgeschwindigkeit und das Spurwechselverhalten, mit den Kenngrößen Spurwechselanzahl und Ausscherzeitlücke sowie das Abstandsverhalten und die Spurwahl untersucht.

Jedoch kommen die verschiedenen Studien zu auffallend unterschiedlichen Ergebnissen: So wird in den Studien von [Stanton & Young 1997] und [Saad & Villame 1996] kein Einfluss auf die durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit festgestellt, während sich in anderen Studien die durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit mit ACC einmal erhöht (vgl. [Ward et al. 1996] und [Hoedemaker & Brookhuis 1998]) einmal abnimmt (vgl. [Hoedemaker & Kopf 2001], [Toenros et al. 2002], [Bjorkly et al. 2003], [Kovordanyi 2005], [Tricot 2004 et al.]). Zusätzlich dazu stellt [Hoedemaker 2000] eine durch ACC hervorgerufene Harmonisierung der fahrstilspezifischen Einflüsse auf die Geschwindigkeitswahl fest.

Innerhalb des Spurwechselverhaltens wurde in der Vergangenheit die Spurwechselhäufigkeit als abnehmend [Saad & Villame 1996] festgestellt. Bei [Tricot 2004 et al.] wird gezeigt, dass diese fahrstilspezifische Kennzahl mit ACC eine deutlich geringere Streuung aufweist, dass ACC also homogenisierend wirkt. Bei der Ausscherzeitlücke (Definition siehe Kap. 3.7.1.3) sind die Ergebnisse verschiedener Publikationen erneut gegenläufig. [Saad & Villame 1996] stellen eine Vergrößerung fest, während in der Forschungsarbeit von [Toenros et al. 2002] keine signifikante Veränderung ermittelt wurde.

Bei der Abstandshaltung wurden häufig die mittlere Zeitlücke sowie auftretende Minima und Maxima untersucht. In den Arbeiten von [Bjorkly et al. 2003] [Kovordanyi 2005] und [Sayer et al. 1998] wurde festgestellt, dass ACC die mittlere Zeitlücke erhöht und damit zur Sicherheit im Straßenverkehr beiträgt. Dem widersprechen die Untersuchungsergebnisse von

[Hoedemaker & Kopf 2001], [Toenros et al. 2002] und [Stanton & Young 1997], in denen entweder keinen Effekt festgestellt werden konnte, oder die statistischen Auswertungen von [Ward et al. 1996], in denen eine Reduzierung der durchschnittlichen Zeitlücke ermittelt wurde. [Fancher et al. 1998] und [Saad & Villame 1996] haben ferner gezeigt, dass mit ACC die Zahl der kritischen Abstände reduziert werden konnte und dass Abweichungen zwischen den Probanden aufgrund des Fahrstils durch ACC ausgeglichen werden.

Im Bereich des Spurverhaltens dagegen wurden meist ähnliche Ergebnisse ermittelt, hier wurde übereinstimmend festgestellt, dass ACC das Linksfahren fördert [Saad & Villame 1996], [Hoedemaker & Brookhuis 1998], [Nilson 1995], [Toenros et al. 2002].

Die Veränderung des Bremsverhaltens wurde im Kontext mit ACC hauptsächlich in kritischen Fahrsituationen, bei Übernahmesituationen [Weinberger 2001] oder in Verbindung mit Kolonnenstabilität von ACC-Systemen untersucht. Einflüsse auf das Komfortempfinden durch Bremsungen wurden bei [Didier & Landau 2005] untersucht. Dass auch hier Verhaltensänderungen zu erwarten sind, wird in der Arbeit von [Ioannou & Stefanovic 2005] gezeigt. Der Einfluss von ACC wird hier als „glättend“ beschrieben, d.h. ACC wirkt wie ein Tiefpassfilter durch sanftes und intelligentes Nutzen von Gas und Bremse.

Die deutlichen Abweichungen der Ergebnisse der verschiedenen Studien werden durch mehrere testspezifische Faktoren bedingt: Eine maßgebliche Rolle spielt die Methodik der Datenerfassung, insbesondere die Art der Studie (Simulatorversuch, Versuch auf abgesperrter Straße mit gestellten Situationen oder Fahrversuche im realen Verkehr). Ferner haben die Dauer der Versuche und die damit verbundenen Gewöhnungseffekte der Fahrer, sowie die Zahl der Versuchspersonen Einfluss auf die erzielten Ergebnisse. Außerdem unterscheiden sich die in den Versuchen eingesetzten ACC-Ausprägungen stark voneinander. So wurden insbesondere in den frühen Studien Systeme ohne aktiven Bremseneingriff eingesetzt, deren maximale Verzögerung auf das Motorschleppmoment ( $< 0,5 \text{ m/s}^2$ ) begrenzt war. Hinzu kommen länderspezifische Gewohnheiten und Richtlinien aus der Straßenverkehrsordnung, wie z.B. das Rechtsfahrgebot oder Geschwindigkeitsbegrenzungen, die die Vergleichbarkeit erheblich einschränken. Eine ausführliche Übersicht über die Rahmenbedingungen der zitierten Studien ist im Anhang C zusammengestellt. Hierbei sind für jede zitierte Studie die Informationen wie die eingesetzte Testmethode, die Spezifikation des ACC-Systems, die Zahl der Probanden und die Testdauer in tabellarischer Form zusammengestellt. Darüber hinaus sind Literaturübersichten zu Studien mit ACC bei [Saad 2004] und [Winner & Luh 2007] oder im Bericht des AIDE Projekts [AIDE] zu finden. Erste Ansätze die Vielzahl der Studien zusammenzufassen zeigt [Dragutinovic et al. 2005] mit seinem „meta-analytischen“ Ansatz.

Ein wesentlicher Faktor für die Verhaltensänderungen des Fahrers durch ACC ist auch die Weiterentwicklung des ACC-Systems, insbesondere der Algorithmen und der Sensoren. So prägen die Verfügbarkeit, die Transparenz der Systemgrenzen und der Funktionsumfang maßgeblich das Nutzungsverhalten des Fahrers.

Dieser Überblick der Literatur zeigt, wie sehr die unterschiedlichen Voraussetzungen der Studien und die Weiterentwicklung der ACC-Systeme die vergleichende Bewertung der Ergebnisse erschweren und wie unterschiedlich die Ergebnisse zu Fahrerverhaltensänderungen durch ACC ausfallen. Somit ist eine dezidierte neuerliche Analyse der

Fahrerhaltensänderungen durch ACC notwendig, damit gezielte Verbesserungen im ACC-System umgesetzt werden können.

### **3.2 Diskussion von Simulator- und Realfahrversuchen**

Zur Entwicklung, Evaluierung und Bewertung von Fahrerassistenzsystemen haben sich in der Vergangenheit verschiedene Testverfahren etabliert. Für die makroskopische Analyse werden häufig Verkehrssimulationen eingesetzt. Um mikroskopische Fragestellungen wie Komfortempfinden und Nutzertransparenz zu untersuchen oder Fahrerhaltensanalysen durchzuführen, werden häufig Fahrsimulatoren oder Realfahrversuche eingesetzt.

Die Simulatoren werden üblicherweise hinsichtlich ihres Bewegungssystems (vgl. z.B. [Bock 2005]) eingeteilt. Hierbei wird unterschieden in statische und dynamische Fahrsimulatoren. Eine weitere Möglichkeit ist die Einteilung nach der Detaillierung und den Rahmenbedingungen in idealtypische (z.B. Labortests) und realtypische Simulatoren (z.B. Fahrsimulatoren) (vgl. [Bruder & Abendroth 2007]).

Innerhalb der Fahrversuche im realen Messfahrzeug wird zwischen Fahrversuchen auf abgesperrtem Testgelände, Fahrversuchen im realen Verkehr mit Versuchsleiter und Alltagsfahrversuchen unterschieden (vgl. [Rohmert 1987], [Bruder & Abendroth 2007]). Einen hybriden Ansatz, diese Trennung zwischen Simulator und Realfahrversuch zu überwinden, stellt [Bock 2005] mit seinem Konzept vom Versuchsträger in virtueller Fahrumgebung (Vehicle in the Loop) vor. Alle genannten Test- und Bewertungsverfahren erbringen verwertbare Ergebnisse, wenn sie abhängig von der konkreten Fragestellung, von der Phase innerhalb des Produktentwicklungsprozesses, vom Untersuchungsziel, und vom angemessenen Aufwand für die Fragestellung verantwortungsvoll eingesetzt werden.

Grundsätzliche Unterschiede bestehen zwischen der Kontrollierbarkeit der Randbedingungen und der Variablen, sowie der Gültigkeit der gewonnenen Erkenntnisse. Diese teilweise konträren Zielsetzungen werden bei [Bruder & Abendroth 2007] unter den Begriffen externe und interne Validität zusammengefasst. Um Ergebnisse zu erzielen, die einerseits eine angemessene Reliabilität und andererseits eine geringe Varianz aufweisen, muss für die jeweilige Fragestellung die geeignete Testmethode ausgewählt werden.

Für die vorliegende Fragestellung, die Analyse des Fahrerhaltens unter dem Einfluss von ACC, stehen die Interaktionen zwischen dem Proband und dem realen Verkehr im Vordergrund. Daneben ist es wichtig, dass der Proband auftretende Gefahren (insbesondere in Spurwechselsituationen) realistisch wahrnimmt und ein normales Risikoverhalten zeigt. Grundlage hierfür ist eine natürliche Wahrnehmung von Abständen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen, die im Simulator konzeptbedingt nur eingeschränkt möglich ist. Aus diesen Gründen wird ein Fahrversuch in Realfahrt zur Analyse des Fahrerhaltens ausgewählt. Hierbei sind die oben genannten Varianten auf abgeschlossenem Prüfgelände, auf einer Messstrecke im öffentlichen Verkehr mit Versuchsleiter oder eine Alltagsnutzung, prinzipiell möglich.

Den Versuch auf einem Testgelände durchzuführen ist aufgrund der notwendigen Interaktionen mit anderen Verkehrsteilnehmern nicht sinnvoll, sowie aufgrund des normalen

und kalkulierbaren Risikos innerhalb des Versuchs nicht erforderlich. Eine Alltagsnutzung des Versuchsfahrzeugs durch die Probanden ohne einen Versuchleiter ist nicht möglich, weil ein zweiter Fahrversuch (Kap. 5) durchgeführt wird, bei dem die eingesetzten Vorentwicklungssoftwarestände diesen Versuchstyp aus Haftungsgründen ausschließen. Somit müssen eventuell entstehende Versuchleitereffekte bei der Auswertung der Daten berücksichtigt werden. Um dennoch ein möglichst natürliches Nutzungsverhalten zu erhalten, wurde ein intensives ACC-Training erarbeitet (vgl. Kap. 3.4.3).

Zusammenfassend bietet ein Fahrversuch im öffentlichen Verkehr auf einer definierten Versuchstrecke für diese Fragestellung den besten Kompromiss hinsichtlich der Kontrollierbarkeit der Umgebungsbedingungen und der damit verbundenen Vergleichbarkeit und der zu erwartenden Aussagekraft für die Gestaltung neuer Fahrerassistenzsysteme.

### **3.3 Erwartete Fahrerhaltensänderungen mit ACC**

Die Veränderungen des Fahrerhaltens, die bei der Nutzung von ACC zu erwarten sind, werden im Folgenden als Hypothesen formuliert:

Hypothese 1:

Ein erfahrener ACC-Nutzer beginnt einen Spurwechsel aus Freifahrt mit ACC früher, also mit größerem Ausscherabstand zum Vorderfahrzeug. Ursächlich dafür ist ein erlerntes Kompensationsverhalten, um zu frühen ACC-Bremungen zuvor zu kommen.

Hypothese 2:

Die Ausschergeschwindigkeit beim Spurwechsel wird durch Bremsungen des ACC Systems in der Annäherungsphase reduziert und liegt unterhalb des Vergleichswerts aus der Fahrt ohne ACC.

Hypothese 3:

Fahrer mit ACC reduzieren ihre normale Zahl von Spurwechseln in einer vergleichbaren Periode und fahren vermehrt auf der linken Spur.

Hypothese 4:

Das Annäherungsverhalten an ein Vorderfahrzeug in Fahrten ohne ACC ist situationsbedingt abhängig davon, ob dieses überholt werden kann oder nicht. Hier werden Unterschiede zwischen der Fahrt ohne ACC und der Fahrt mit ACC in den Kenngrößen Bremsbeginn und maximale Bremsbeschleunigung erwartet.

Hypothese 5:

In der subjektiven Wahrnehmung des Probanden wird das nicht situative Annäherungsverhalten als sehr störend empfunden. Es werden Abhilfemaßnahmen wie häufige Übertretungen des ACC-Systems mit dem Gaspedal gewählt.

Hypothese 6:

Durch die wenig vorausschauende Fahrweise des ACC-Systems, insbesondere in Annäherungs- und Einschersituationen, werden bei Fahrten mit ACC mehr starke Bremsungen in einem vergleichbaren Messzeitraum nötig als bei der Fahrt ohne ACC.

Hypothese 7:

Durch ACC stellen Fahrer ihr Fahrverhalten in der Weise um, dass der Anteil an Folgefahrtsituationen steigen wird. Ablesbar wird dies an der steigenden Anzahl von Folgespurwechseln im Verhältnis zu sinkenden Annäherungsspurwechseln sein, sowie an einem größeren Abstand beim Ausscheren zu Spurwechselbeginn.

### **3.4 Aufbau des Fahrversuchs**

Die Probandenstudie wurde im Zeitraum September bis November 2005 im realen Straßenverkehr durchgeführt. Die Wetterbedingungen waren in dem Zeitraum stabil und sonnig, bei stärkerem Regen wurden wegen der dann eingeschränkten Sicht der Kamera und der daraus resultierenden mangelhaften Güte der Daten keine Versuchsfahrten unternommen. Sowohl die Messfahrt mit ACC als auch die Messfahrt ohne ACC wurde bei allen Probanden zur gleichen Tageszeit gestartet, der Beginn der ersten Messfahrt (ohne ACC) war hierbei circa um 9 Uhr morgens, der Beginn der zweiten Messfahrt (mit ACC) war gegen 14 Uhr. Durch diese Maßnahmen konnte gewährleistet werden, dass keine Unterschiede im Fahrverhalten auf Anpassungen wegen des Wetters oder der Sichtverhältnisse zurückzuführen sind (vgl. [Schlag & Richter 2000], [Ebersbach 2005]).

Alle Mess- und Trainingsfahrten wurden auf öffentlichen Straßen durchgeführt, lediglich die Eingewöhnungsphase an das Fahrzeug und die Einweisung in die Bedienelemente des ACC-Systems wurde auf einem abgesperrten Bereich absolviert. Als Versuchsstrecke dienten Autobahnabschnitte der A99, A94 und A8 im Süden und Osten von München mit einer Gesamtlänge von ca. 100 km und einer durchschnittlichen Fahrzeit von ca. 1 Stunde (siehe Bild 3.1).



*Bild 3.1: Übersicht der Versuchsstrecke*

Diese Versuchsstrecke wurde sowohl in der Messfahrt mit ACC als auch in der Fahrt ohne ACC von den Probanden durchfahren.

Das ACC-Training wurde auf einem ca. 180 km langen Streckenabschnitt auf der A8 abseits der Versuchsstrecke absolviert. Bei dem ausgewählten Streckenabschnitt handelt es sich um zwei- und dreispurige Autobahnabschnitte mit niedriger bis mittlerer Verkehrsdichte. Während der gesamten Fahrt waren die Probanden angewiesen die Verkehrsregeln einzuhalten und eine Richtgeschwindigkeit von 140 km/h nicht zu überschreiten. Diese Richtgeschwindigkeit wurde definiert um die Probanden zu animieren, die Spur zu wechseln und einem dauerhaften Fahren auf der linken Spur über einen langen Zeitraum vorzubeugen. Während der Fahrt auf der Versuchsstrecke wurden alle Daten der unten in Kapitel 3.4.1 genannten Sensoren erfasst.

### **3.4.1 Versuchsträger**

Für die Versuchsfahrten wurde ein Audi A6 Avant 3.0 Diesel quattro als Versuchsträger aufgebaut, ausgerüstet mit umfangreicher Umfeldsensorik, um das Fahrverhalten hinreichend analysieren zu können. Hierbei wurde der 77GHz Radar-Sensor des ACC-Systems zur Objekterkennung nach vorne eingesetzt. Der Sensor ist zentral mittig im Fahrzeug verbaut, hat einen Öffnungswinkel von  $16^\circ$  und eine Reichweite von 180 m. Über die Entwicklungsschnittstelle werden zyklisch mit einer Taktzeit von ca. 100 ms die lateralen und longitudinalen Objektpositionen, -geschwindigkeiten und -beschleunigungen aller im Detektionsbereich befindlichen Objekte übergeben. Ferner stehen für die Auswertung spezifische Daten der Zielobjektauswahl, der Fahrschlauchbildung und ausgewählte interne Reglergrößen zur Verfügung.

Zur Spurerkennung und Dokumentation der Fahrszene wird der Monovideosensor aus dem LKA eingesetzt. Diese CMOS Kamera, ausgerüstet mit automatischer Belichtungssteuerung, ist hinter dem Innenspiegel in Fahrtrichtung verbaut und hat einen Öffnungswinkel von  $31^\circ$ . Die Extraktion der Spurmerkmale erfolgt über ein kantenbasiertes Bildverarbeitungsverfahren bis zu einer Vorausschauweite von maximal 60 m. Für die Auswertung stehen spurspezifische

Größen wie Spurbreite, Spurmarkierungsart, Querablage, Gierwinkelfehler, Krümmung und Krümmungsänderung zur Verfügung. Außerdem sind Statusinformationen über den aktuellen Warnzustand des Systems abrufbar. Alle Fahrspurinformationen beziehen sich auf die Ego-Fahrspur, eine Klassifikation der Nebenspuren erfolgt nicht. Die Funktionsgrenzen des Systems resultieren hauptsächlich aus den vorliegenden Lichtverhältnissen und dem Kontrast zwischen Fahrspur und Spurmarkierung.

Zusätzlich ist das Versuchsfahrzeug mit zwei nach hinten gerichteten 24 GHz Radar-Sensoren in Master-Slave-Anordnung aus dem LCA zur Objekterkennung ausgestattet. Diese Sensoren sind jeweils seitlich außen in den Stoßfänger integriert, haben einen Öffnungswinkel von 35° und eine Reichweite von ca. 50 m. Neben Daten zum aktuellen Warnstatus liefert das LCA-System Daten über die laterale und longitudinale Position und die zugehörigen Geschwindigkeiten der Objekte im Rückraum.

Für die weite räumliche Vorausschau wurde eine Schnittstelle zum Navigationssystem über prädiktive Streckendaten (PSD) in das Fahrzeug integriert. In den prädiktiven Streckendaten sind Attribute wie die Straßenklasse, die Fahrspuranzahl oder Kreuzungen und Abfahrten entlang der erwarteten Fahrtroute hinterlegt. Ansätze zur Nutzung von prädiktiven Streckendaten sind im Kontext der ACC-Weiterentwicklung in der Literatur z.B. bei [Baum et al. 1996], [Hamberger 1999] oder [Brandstätter et al. 2004] zu finden. In Bild 3.2 sind die Sichtbereiche der Einzelsensoren des Versuchsträgers schematisch dargestellt.

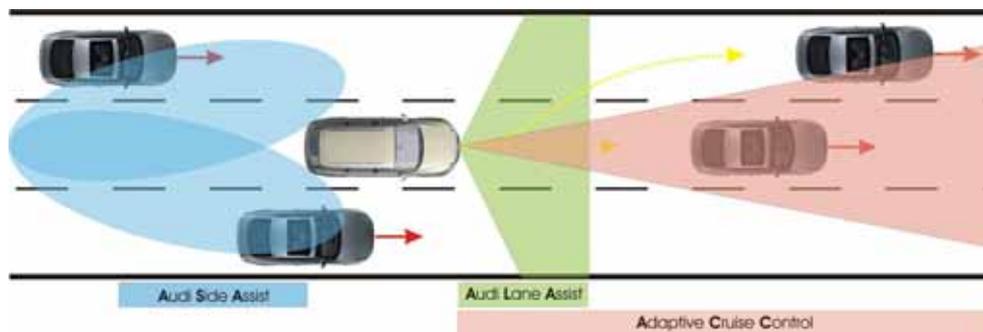


Bild 3.2: Schematische Sichtbereiche der Sensorik von ACC, LCA und LKA

Die eingesetzte Sensorik entspricht damit der Seriensensorik der Fahrerassistenzsysteme ACC, LCA und LKA. Auf Zusatzsensorik wurde bewusst verzichtet, um die Nähe zur Serienkonfiguration der Systeme zu halten. Dadurch können die gewonnenen Erkenntnisse über das Fahrverhalten und das daraus abgeleitete Fahrermodell direkt für zukünftige Serienprojekte auch in anderen Fahrzeugen verwendet werden. Die Daten aller Umfeldsensoren und der odometrischen Sensoren werden zentral durch den Datenrekorder (Automotive Data and Time Triggered Framework) erfasst und zeitlich mit den Videodaten der Fahrscenenkamera (5 Frames pro Sekunde) synchronisiert. Wetterbedingte Ausfälle der Sensoren und eine damit verbundene eingeschränkte Verfügbarkeit traten während der Messfahrten nicht auf.

### 3.4.2 Charakteristik der Probanden

Für die Probandenstudie zur Analyse der Veränderung des Fahrverhaltens unter dem Einfluss von Fahrerassistenzsystemen wurden Probanden mittleren Alters mit Fahrerfahrung, die privat Fahrzeuge der Mittel- und Oberklasse nutzen, ausgewählt. Diese Auswahl orientiert sich hierbei an der Zielgruppe für heutige ACC-Fahrzeugkäufer. Die Probanden wurden über Annoncen und Aushänge gefunden. Über ein Telefoninterview wurde die Vorselektion entsprechend der oben genannten Kriterien durchgeführt. An der Studie waren 26 Probanden beteiligt, 15 Männer (57%) und 11 Frauen (43%). Das Durchschnittsalter lag bei 47 Jahren (Standardabweichung: 9 Jahre). Es waren durchweg erfahrene Autofahrer mit einer durchschnittlichen Fahrerfahrung von 27 Jahren (Standardabweichung: 8 Jahre) beteiligt. Alle Fahrer gaben an, ihr Fahrzeug täglich zu nutzen. Davon fuhren 19% jeden Tag auf der Autobahn, weitere 58% mehrmals oder zumindest einmal in der Woche (siehe Bild 3.3).

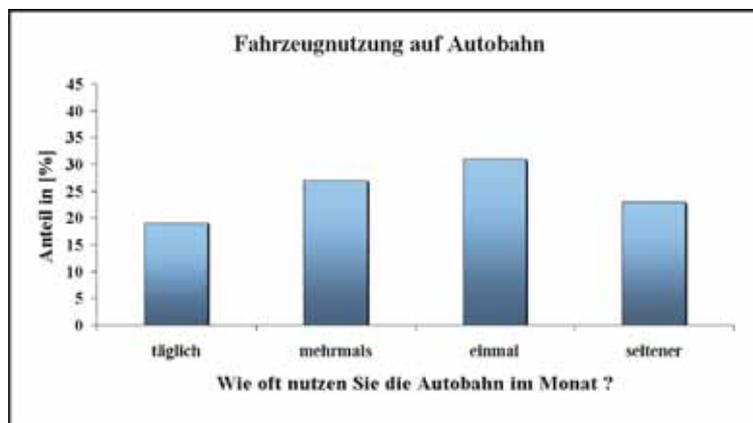


Bild 3.3: Fahrzeugnutzung der Probanden auf der Autobahn

### 3.4.3 Ablauf der Probandenstudie

Der Ablauf des Fahrversuchs war in fünf aufeinander aufbauende Phasen gegliedert, beginnend mit der Eingewöhnungsphase der Probanden an das Versuchsfahrzeug. Neben der Gewöhnung an das Fahrzeug und die Fahreigenschaften wurde die Nutzung der normalen Bedienelemente wie das Mensch-Maschine-Interface (MMI) trainiert. Die einzelnen Phasen des Fahrversuchs sind in Bild 3.4 dargestellt.

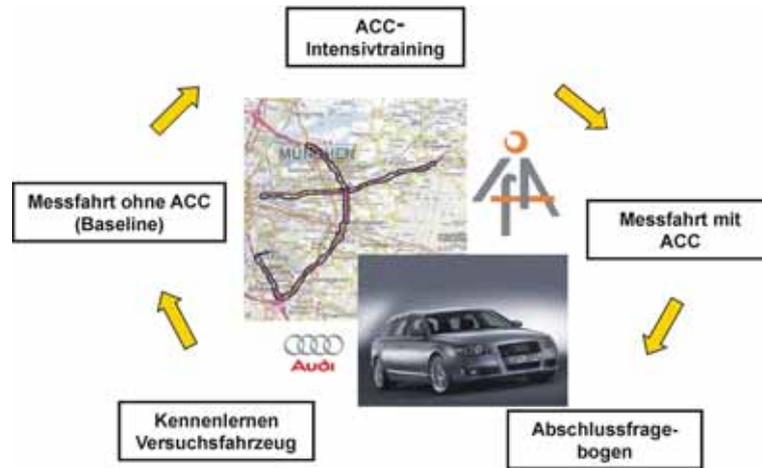


Bild 3.4: Ablauf der Probandenstudie

Nach der Eingewöhnungsphase wurde die oben beschriebene Versuchsstrecke in der ersten Messfahrt ohne die Unterstützung durch Fahrerassistenzsysteme befahren. Die Navigation innerhalb der Versuchsstrecke erfolgte mittels Ansagen zu festen Zeitpunkten durch den Versuchsleiter.

In der dritten Phase wurde mit den Probanden ein intensives ACC-Training durchgeführt (siehe Bild 3.5). Grundlage hierfür war ein Szenarien-katalog von Situationen, die ein Fahrer während der Trainingsphase erleben sollte. Der Aufbau des ACC-Trainings berücksichtigt Erkenntnisse von [Kopf & Simon 2001], nach denen der Lernprozess der ACC-Nutzung in drei Teile unterteilt ist: in das generelle Bedienen des Systems (Testphase), den Einsatz des Systems in definierten Szenarien und das Kennenlernen der Systemgrenzen.

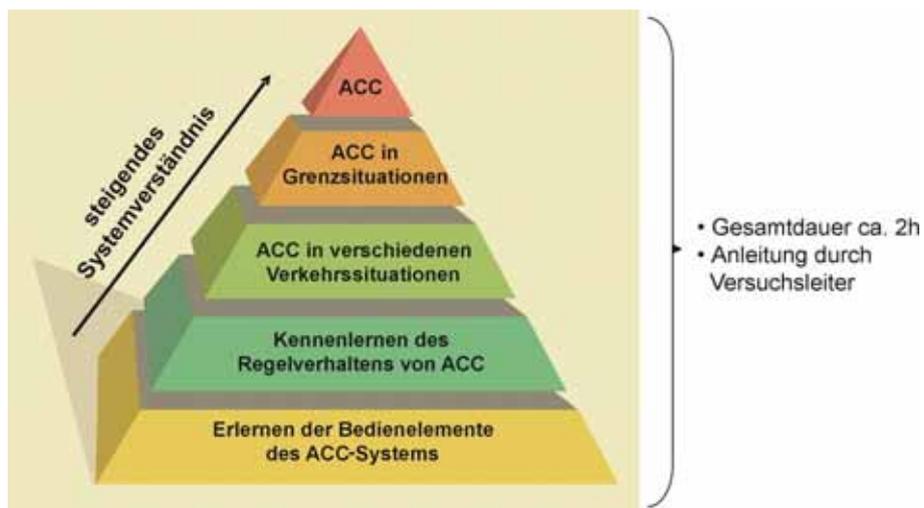


Bild 3.5: Ablauf des ACC-Trainings

Durch das intensive ACC-Training wird gewährleistet, dass sich unter den Fahrern ein ähnliches Systemverständnis für das Assistenzsystem ACC ausbildet. Im Fokus standen dabei sowohl alltägliche Situationen im Umgang mit ACC, wie z.B. Annäherungen an Vorderfahrzeuge oder Anpassungen der Wunschgeschwindigkeit, als auch das Kennen lernen der Systemgrenzen von ACC, beispielsweise in kritischen Einschersituationen oder anderen

Fahrerübernahmesituationen. Der Fahrer sollte in dieser Phase einen natürlichen Umgang mit ACC erlernen. Hierbei wurde auch auf ein bewusstes Abschalten per Bedienelement oder Bremspedal und auch auf die Möglichkeit des Übertretens per Gaspedal hingewiesen.

Wenn diese verhaltensprägenden Situationen während des ersten Teils des Trainings nicht durch das normale Verkehrsgeschehen und das Verhalten des Fahrers auftraten, wurden die ausstehenden Situationen durch den Versuchsleiter mittels Anweisungen an den Fahrer bewusst provoziert. Mit dem ACC-Training sollte erreicht werden, dass die Probanden in der kurzen zur Verfügung stehenden Zeit alle wichtigen Erfahrungen mit dem ACC-System machen konnten, die sie im normalen Lernprozess sonst in den ersten Wochen der Systemnutzung erworben hätten. Insgesamt dauerte das ACC-Training ca. 2 Stunden mit einer Fahrstrecke von mehr als 180 km. Hiermit liegt die zurückgelegte Wegstrecke über der Schwelle von 100 km nach denen [Kopf & Nirschl 1997] deutliche Lerneffekte feststellen konnten. Im Anschluss folgte die zweite Messfahrt auf der Versuchsstrecke mit aktivem ACC, in der die Fahrer wieder frei von Anweisungen des Versuchsleiters die Messstrecke abfahren mussten. Abgeschlossen wurde die Probandenstudie von einem Fragebogen, in dem Fragen zur Systemakzeptanz und zur Situationsbewertung zu beantworten waren.

### **3.5 Probandenzuordnung zu Fahrstilen**

Im Literaturüberblick Kapitel 3.1 konnte gezeigt werden, dass die Ergebnisse zu Fahrerverhaltensänderungen durch ACC stark divergieren. Neben dem dort ausführlich diskutierten Einfluss der Rahmenbedingungen auf die Ergebnisse sind diese auch stark beeinflusst von der Zusammensetzung der Stichprobe bezüglich des Fahrstils.

Der Fahrstil beschreibt hierbei die zusammengefassten, situativen Verhaltensweisen eines Fahrers im Straßenverkehr. Häufig wird der Fahrstil (trait) als eine über einen langen Zeitraum entwickelte Fahrweise definiert (vgl. [Deml et al. 2006]). Überlagert werden diese langfristig erlernten Handlungsmuster durch das aktuelle Fahrverhalten (state). Hierin sind situative Einflussfaktoren, wie z.B. akuter Termindruck, zusammengefasst, die eine kurzfristige Änderung des Normalverhaltens bewirken können. Beide Anteile sind in der Realität häufig schwer von einander zu trennen. Innerhalb der Probandenstudie wurden die Rahmenbedingungen für alle Probanden so identisch wie möglich gehalten. Daher ist davon auszugehen, dass der Einfluss des 'state' hier sehr gering ausfällt und der 'trait' das dominante Element ist. Allerdings muss erneut der verschieden stark ausgeprägte Versuchsleitereffekt bei der Interpretation als verfälschender Faktor berücksichtigt werden.

Veröffentlichungen, in denen Fahrer aufgrund ihres Fahrverhaltens einem Fahrstil zugeordnet werden, sind in der Literatur häufig in Zusammenhang mit der Generierung von Fahrermodellen zur Beschreibung, Prädiktion oder Simulation des natürlichen Fahrverhaltens zu finden (vgl. [Ebersbach 2005], [Biral et al. 2005]). Hierdurch soll die große Bandbreite des normalen Fahrverhaltens besser abbildbar gemacht werden. Neben diesem Einsatzbereich wird häufig auch bei der Rekonstruktion von Unfällen und der Ermittlung der Schuldfrage versucht, Fahrer einem speziellen Fahrstil zuzuordnen. Gängig im Sprachgebrauch sind dafür beschreibende Worte wie Raser, ängstlicher Fahrer, vorsichtiger Fahrer, komfortabler Fahrer etc. (vgl. [Adelt et al. 1999]).

Ein weiteres Einsatzgebiet dieser Fahrstilzuweisungen sind moderne elektronische Systeme im Kfz, die sich an den Fahrer und seinen Fahrstil adaptieren. So sind z.B. selbstlernende adaptive Getriebesteuerungen bei Automatikgetrieben, und damit ein angepasstes Schaltverhalten, heute Stand der Technik. Insbesondere durch die stärker werdende öffentliche Debatte zur Verbrauchsoptimierung und das steigende Umweltbewusstsein werden hier abhängig vom erkannten Fahrstil beispielsweise die Schaltzeitpunkte modifiziert. Dass zwischen verschiedenen Fahrstilgruppen hierbei systematische Unterschiede bestehen, kann bei ([de Vlieger et al. 2000], [Raffael et al. 2006] oder [Hamberger 1999] nachgelesen werden. Auch in den klassischen Bereichen der Fahrdynamik hat der Fahrstil als Variationsparameter Einzug gehalten. Bestellt der Fahrer heutzutage ein Fahrzeug mit Luftfederung anstatt eines Stahlfahrwerks oder werden technische Neuerungen, wie eine elektronische Dämpferregelung gewünscht, hat der Fahrer hier die Möglichkeit über ein Menü die Sportlichkeit einzustellen. Grundlage hierfür ist die Selbsteinschätzung des Fahrers und die Zuordnung des eigenen Fahrstils zu den wählbaren Prädikaten „Comfort“, „Standard“, „Dynamic“. Alternativ kann der Fahrer der automatischen Auswahl durch die Elektronik des Systems im Modus „Automatic“ vertrauen. Im Feld der Fahrdynamik konnten bei der Wahl der Quer- und Längsbeschleunigung signifikante Vorlieben zwischen den verschiedenen Fahrstilen, beispielsweise bei [Tricot et al. 2002], [Neumerkel et al. 2002] oder [Biral et al. 2005], festgestellt werden.

Auch bei modernen Fahrerassistenzsystemen existieren diese Einstellmöglichkeiten. Beispielsweise kann der Fahrer in LKA-Systemen, abhängig von seinem persönlichen Sicherheitsbedürfnis und Risikobewusstsein, den Warnzeitpunkt des Systems in den Grenzen „früh“, „adaptiv“ und „spät“ passend zu seinem individuellen Fahrstil einstellen. Bei ACC-Systemen hat sich sowohl die Fahrprogrammauswahl (dynamic, standard, comfort) als auch die Variationsmöglichkeit der Zeitlücke etabliert. Der Fahrer kann hierbei abhängig von seinem Fahrstil und der momentanen Fahrsituation das Regelverhalten des Systems anpassen. [Hoedemaker et al. 1998] und [Canale & Malan 2002] haben in ihren Arbeiten die Akzeptanz unterschiedlicher ACC-Auslegungen abhängig vom Fahrstil der Probanden untersucht und einen ersten Ansatz zur fahrstilspezifischen Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen aufgezeigt.

Viele der vorgestellten Untersuchungen zur Zuordnung von Fahrern zu Fahrstilklassen haben eine dreistufige Skala verwendet. Als Methoden zur Klassifikation wurden zum einen subjektive Bewertungsverfahren, wie die Selbsteinschätzung der Probanden, oder die Bewertung durch einen Experten, z.B. Versuchsleiter oder Fahrlehrer, eingesetzt. Zum anderen wurde in verschiedenen Studien versucht, anhand von objektiven Merkmalen, wie beispielsweise dem Bremsverhalten oder der Querbeschleunigung, eine Zuordnung möglich zu machen. In dieser Arbeit wurden diese verschiedenen Analysemethoden parallel verfolgt und ausgewertet. Im ersten Schritt wurden die Probanden mit Hilfe des Fragebogens aufgefordert, ihren eigenen Fahrstil selbst einzuschätzen (siehe Bild 3.6).

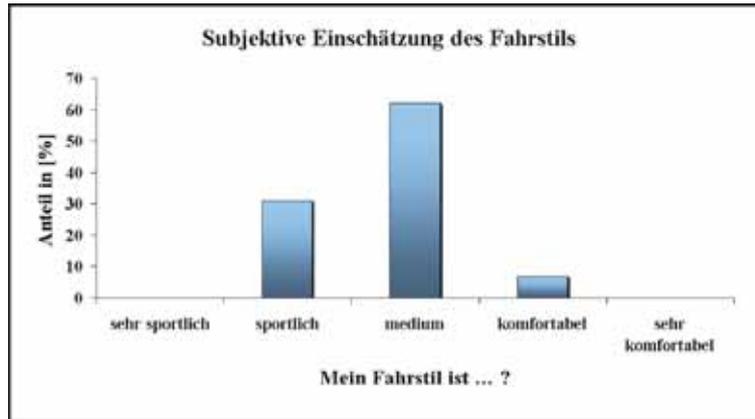


Bild 3.6: Selbsteinschätzung des Fahrstils

Auffällig an diesem Ergebnis ist, dass keiner der Untersuchungsteilnehmer seinen eigenen Fahrstil als „sehr sportlich“ oder „sehr komfortabel“ einstuft und dass 63% sich direkt in der Mitte einstufen. Neben der Selbsteinschätzung erfolgte auch eine unabhängige Fremdeinschätzung durch die beiden Versuchsleiter. Hierbei ließ sich kein signifikanter Zusammenhang zwischen den Fremdeinschätzungen und der Selbsteinschätzung des Probanden feststellen. Lediglich zwischen der Bewertung durch den einen und den anderen Versuchsleiter konnte ein signifikanter Zusammenhang nachgewiesen werden.

Neben diesen weniger geeigneten subjektiven Merkmalen zur Klassifikation der Fahrstile wurden objektive Messdaten der Probanden zur Klassifikation herangezogen. Die objektiven Merkmale beziehen sich hierbei auf die Versuchsfahrt ohne ACC, da in dieser die Probanden ihr „normales“ Fahrverhalten ohne den Einfluss von ACC zeigen. Die Analyse des Fahrstils stützt sich auf drei besonders aussagekräftige Variablen, die über eine Korrelationsanalyse (vgl. Anhang A) ermittelt wurden: die Anzahl der Spurwechsel nach links ( $SW_{\text{Anzahl}}$ ), die Durchschnittsgeschwindigkeit ( $v_{\text{Mittel}}$ ) sowie die mittlere Zeitlücke zu Vorderfahrzeugen ( $Tn_{\text{Gesamt}}$ ). Diese Korrelationsanalyse wurde zur Vorauswahl potentiell relevanter Merkmale vorab durchgeführt. Die gefundenen Merkmale wurden dann einer Clusterzentrenanalyse (vgl. Anhang A) (k-means Algorithmus) unterzogen (vgl. [Deml et al. 2006], [Freyer et al. 2007]) (siehe Tabelle 3.1).

N = 26	Cluster 1 (N = 9)	Cluster 2 (N = 9)	Cluster 3 (N = 8)
	<i>sportlich</i>	<i>moderat</i>	<i>komfortabel</i>
$v_{\text{Mittel}}$ (km/h)	108,3 (0,76)	103,8 (0,345)	94,9 (-1,24)
$SW_{\text{Anzahl}}$ [1/100km]	42,5 (0,99)	33,3 (-0,36)	26,4 (-0,71)
$Tn_{\text{Gesamt}}$ [s]	1,85 (-0,90)	1,98 (0,00)	2,22 (1,01)
<i>Fahrt ohne ACC – Clusterzentren (z-standardisierte Werte in Klammern)</i>			

Tabelle 3.1: Clusteranalyse zur Fahrstileinteilung

Hierdurch lässt sich eine Gruppe von Probanden einem der Fahrstile zuordnen. Voraussetzung für eine präzise Zuordnung ist hierbei nach [Backhaus 2006], dass die verschiedenen Gruppen in sich möglichst homogen und die Gruppen untereinander möglichst heterogen sein sollten.

Anhand der Variablen zur Klassifikation lassen sich drei verschiedene Fahrstile identifizieren. Die erste Gruppe der Fahrer (N=9) wird über ihr Fahrverhalten als „sportliche“ Fahrer definiert. Sie ist gekennzeichnet durch die geringsten durchschnittlichen Abstände, die höchsten Durchschnittsgeschwindigkeiten und die meisten Spurwechsel. Betrachtet man die euklidische Distanz zu den anderen beiden Clusterzentren, so ist diese zur zweiten Gruppe (dz 1,2 = 1,674) kleiner als zur dritten (dz 1,3 = 3,244). Die zweite Gruppe (N=9) liegt zwischen den beiden anderen Fahrstilen und wird unter dem Prädikat „medium“ bzw. „moderat“ zusammengefasst. Ihre euklidische Distanz zur ersten beziehungsweise dritten Gruppe (dz 2,3 = 1,915) ist fast gleich groß. Die dritte Gruppe der Fahrer ist gekennzeichnet durch die langsamste Durchschnittsgeschwindigkeit, den größten mittleren Abstand und die geringste Zahl von Spurwechseln. Diese Gruppe wird im Folgenden als Fahrer mit „komfortablem“ Fahrstil bezeichnet. Für die so gefundene Einteilung nach Fahrstilen wird die Korrelation zur Fremdeinschätzung durch die Versuchsleiter überprüft. Es zeigt sich, dass eine hohe Korrelation (Korr. Spearman:  $r=0,710$ ;  $p=0,000^*$ ) zwischen der Einschätzung durch die Versuchsleiter und der Fahrstilzuordnung anhand der objektiven Merkmale besteht. Um die Validität dieser Zuordnung noch zu erhöhen wird in Kapitel 5.4 auf Basis der Daten der zweiten Probandenstudie erneut die Fahrstilklassifikation durchgeführt. Für eine detaillierte Beschreibung der Erhebung des Fahrstils sei an dieser Stelle auf die Veröffentlichungen von [Deml et al. 2006], [Deml et al. 2007] und [Freyer et al. 2007] verwiesen. Dort werden auch weiterführende Ansätze für eine Fahrstilprädiktion online im Fahrzeug, auf Basis der Analyse der Längs- und Querbeschleunigungen in Referenzsituationen vorgestellt.

### **3.6 Fahrerverhaltensänderungen und Systemakzeptanz – subjektive Sicht**

Die statistische Auswertung des Fragebogens ergab die im Folgenden dargestellten Ergebnisse. Der gesamte Fragebogen sowie eine kurze Übersicht der eingesetzten statistischen Methoden sind im Anhang A zu finden. Im ersten Teil des Fragebogens wurden allgemeine Daten wie Alter, Geschlecht etc. erhoben. Der zweite Teil des Fragebogens umfasste Fragen zur Wahrnehmung von Verhaltensänderungen sowie Fragen zur Bewertung der Akzeptanz und des Umgangs mit ACC. Dieser zweite Teil des Fragebogens wurde nach dem Ende der beiden Messfahrten gestellt.

Von den Probanden wird das Training und seine Dauer durchweg als ausreichend bewertet (100%). Dazu geben 92% an, ein hohes oder sehr hohes Vertrauen in das ACC-System zu besitzen. Beide Attribute haben hierbei eine deutliche Korrelation zueinander (Korr. Spearman  $r=0,598$ ;  $p=0,002^*$ ). Zieht man noch den Faktor Systemverständnis und Nutzertransparenz mit hinzu, gaben 48% an, dass das ACC-System immer verständlich war, die anderen 52% verstanden die Reaktion des Systems meistens (siehe Bild 3.7). Keiner dieser Fahrer meinte, die Funktionsweise und die Reaktionen des Systems gar nicht oder kaum verstanden zu haben (Korr. Spearman  $r=0,524$ ;  $p=0,009$  und  $r=0,410$ ;  $p=0,047^*$ ). Diese Merkmale und die signifikanten Korrelationen untereinander lassen durchgängig auf eine hohe Akzeptanz und ein normales Nutzungsverhalten von ACC schließen.

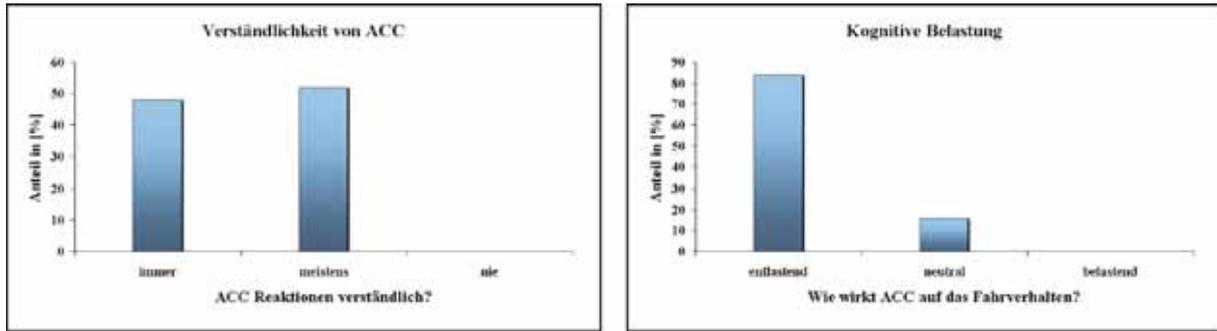


Bild 3.7: Systemverständnis und kognitive Belastung

Unterstützt wird die These, dass die Probanden sich mit ACC vertraut fühlten dadurch, dass 84% ihre kognitive Belastung durch das ACC-System als reduziert empfanden. 16% sahen durch die Nutzung von ACC keinen Einfluss auf ihre Beanspruchung durch die Fahraufgabe (Korr. Spearman :  $r=0,541$ ;  $p=0,005^*$ ).

Bei der Nachfrage nach ihrem Fahrverhalten gaben 76% der Fahrer an, dass ihr Fahrverhalten mit ACC ihrer gewohnten Fahrweise entspricht. Bei der Nachfrage nach spezifischen Fahrsituationen existieren keine durchgängigen Antworttendenzen. Auf die explizite Nachfrage nach dem Überholverhalten reduziert sich die Zahl der Fahrer auf ca. 60%, die ihr Fahrverhalten in dieser Fahrsituation als unverändert betrachten. Ähnlich verhält es sich beim Abfahrverhalten an Autobahnabfahrten, hier gaben nur 40% der Fahrer an, dass ihr normales Fahrverhalten richtig durch ACC repräsentiert wird. Als Lernprozess aus dieser Abweichung zwischen ACC-Verhalten und normalem Fahrverhalten gaben 80% der Fahrer an, dass sie das ACC-System meistens oder immer vor dem Abfahren bei Erreichen des Verzögerungsstreifens deaktivieren. In Einfädelsituationen, in denen gegenüber einfädelnden Fahrzeugen ein kooperatives Verhalten gezeigt wird, äußerten 56% der Fahrer, dass ihr Fahrverhalten vergleichbar war mit und ohne die Nutzung von ACC.

Bei spezifischer Nachfrage nach dem Verhalten in Spurwechselsituationen wird die Überholhäufigkeit als gleich oder seltener erlebt (vgl. Bild 3.8). Nach dem Überholzeitpunkt befragt, gaben (40%) der Fahrer an, dass der Überholzeitpunkt gleich bleibt, oder bewusst zeitlich nach vorne verlegt wurde (44%).

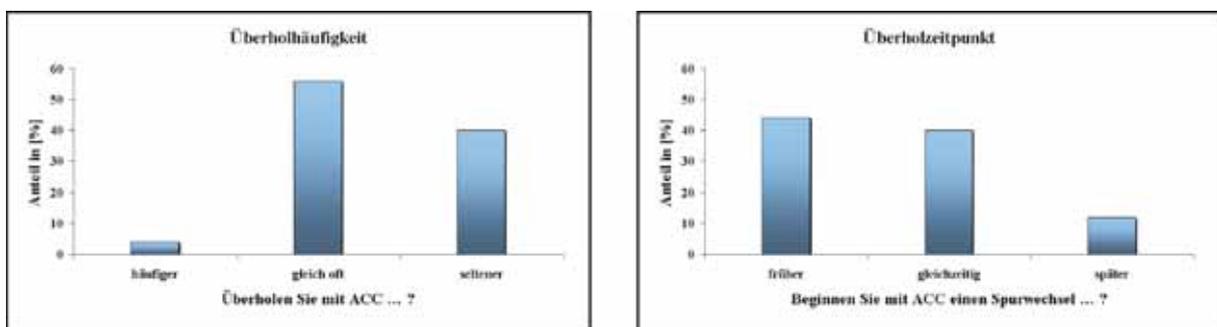


Bild 3.8: Häufigkeit und Zeitpunkt des Überholens

Eine Erklärung hierfür ist der störende Effekt, dass ACC sehr früh mit dem Regulieren der Geschwindigkeit beginnt und dass die Fahrer gelernt haben, mit einem frühen Ausscheren

diesem störenden Bremsen entgehen zu können. Die Hypothese Nr. 1 zu dieser Verhaltensauffälligkeit konnte also auf Basis der Fragebogendaten bestätigt werden.

Trotz dieser vom Fahrer wahrgenommenen Veränderungen im Überholverhalten gaben 8% immer, 88% selten und 4% nie an das ACC-System in Spurwechselsituationen per Gaspedal zu übertreten. Ein möglicher Grund für die geringe angegebene Zahl von Gaspedalübersteuerungen könnte die Anwesenheit des Versuchsleiters sein. Allerdings wurde die Möglichkeit des „Übersteuerns“ den Probanden während des Trainings direkt vorgestellt. Die Hypothese Nr. 5 konnte somit aufgrund der subjektiven Daten der Fragebogenauswertung nur teilweise bestätigt werden.

Setzt man die Ergebnisse in Beziehung zu den getrennten Einschätzungen, zur Veränderung der Abstandshaltung und der Durchschnittsgeschwindigkeit, zeigt sich, dass Fahrer, die ihre ACC-Fahrt als langsamer und mit größerem Abstand als normal wahrgenommen haben, ihre Überholhäufigkeit als signifikant reduziert empfunden haben (Korr. Spearman:  $r=0,587$ ;  $p=0,002^*$ ). Mit dem Transferwissen zu den Merkmalen der Fahrstilklassifikation (vgl. Kap. 3.5) lässt sich hieraus die Aussage ableiten, dass sich insbesondere sportliche Fahrer durch ACC am meisten beeinflusst fühlen.

Ein weiterer Fragenkomplex befasst sich mit der Bewertung des ACC-Systems durch die Probanden. Dabei wurden diese aufgefordert, heutige Grenzsituationen des ACC-Systems im direkten Vergleich zueinander zu bewerten. Im speziellen waren dies die Situationen: Naheinscherer und Einfädelsituationen, Nebenspurstörungen<sup>2</sup>, Zielobjektverluste von ACC, das Beschleunigen von ACC auf Wunschgeschwindigkeit in die Ausfahrt, die Situation Rechtsüberholen durch ACC sowie das erschwerte Überholen durch zu frühes Bremsen. Besonders letzteres wurde von den Probanden als sehr störend bewertet: Vergleicht man die von professionellen Testfahrern als sehr kritisch erachteten Naheinscherersituationen mit dem erschwerten Überholen, fällt auf, dass 72% der Probanden das erschwerte Überholen als störend bis sehr störend empfanden, während die Situation Naheinscherer nur 28% der Probanden beeinflusste oder stark beeinflusste (vgl. Bild 3.9).

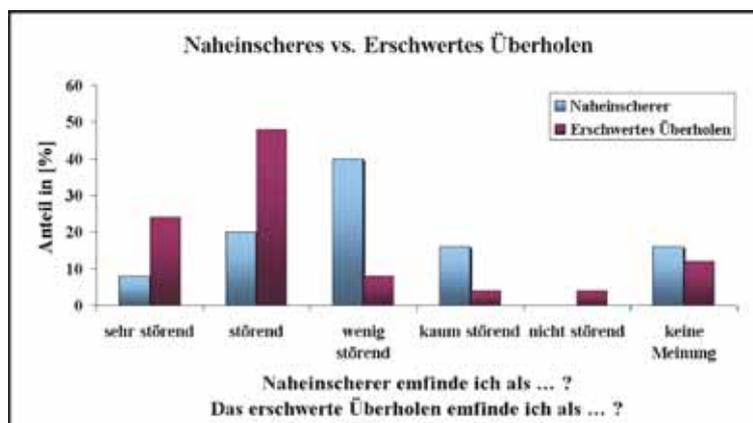


Bild 3.9: Bewertung von ACC-Grenzsituationen

<sup>2</sup> Unter Nebenspurstörungen wird die Auswahl eines nicht relevanten Zielobjekts verstanden

Erklärt werden kann diese Bewertung der Probanden dadurch, dass die Reaktion des frühen Bremsens des Systems in Überholsituationen vom Fahrer nicht verstanden und als sehr unkomfortabel empfunden wird. Erneut besteht eine signifikante Korrelation insofern, dass Fahrer, die die Situation erschwertes Überholen als störend bewerten, bei ihrer Selbsteinschätzung auch ihr Überholverhalten als verändert angeben (N=22; T=-3,044; p=0,006\*). Die Fahrsituation Rechtsüberholen als unerwünschter Nebeneffekt der Wunschgeschwindigkeitsregelung des ACC wurde von einer vergleichbar großen Probandengruppe als ähnlich störend wie das erschwerte Überholen bewertet (vgl. Bild 3.10).

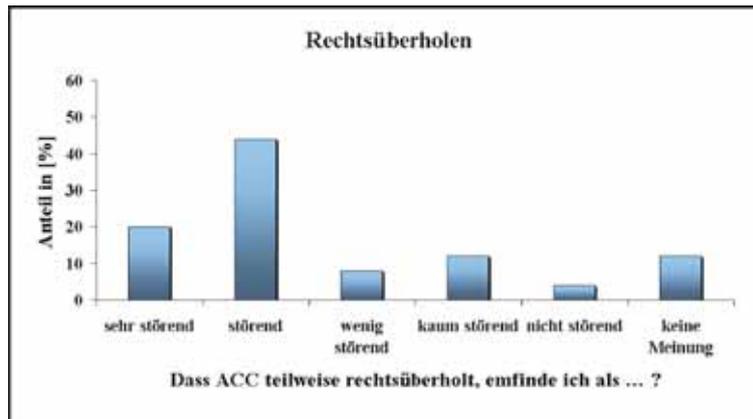


Bild 3.10: Situation Rechtsüberholen

Systemgrenzen, bedingt durch den eingeschränkten Sichtbereich der Sensorik, wie Nebenspurstörungen, Zielobjektverlust oder Naheinscherer, wurden als weniger störend bewertet und traten im Verlauf der Messfahrt deutlich seltener auf. Eine Verbesserung des ACC-Systems in diesem Bereich kann im Besonderen durch eine Verbesserung der Sensorik in Hardware und Software sowie der eingesetzten Detektionsalgorithmen erreicht werden.

Fasst man die Auswertung des Fragebogens zusammen ist erkennbar, dass alle Fahrer durch das ACC-Training ein hohes Systemverständnis und Vertrauen aufgebaut haben. Weitergehend konnte festgestellt werden, dass die Fahrer in ihrer subjektiven Einschätzung ihr allgemeines Fahrverhalten als wenig verändert wahrnehmen, dass aber insbesondere in Spurwechselsituationen stärkere Abweichungen zwischen dem normalen Fahrverhalten und dem Fahrverhalten mit ACC festgestellt wurden. Bei der Bewertung auftretender Grenzsituationen von ACC hat sich gezeigt, dass Störungen, die auf eine nicht angemessene Situationsinterpretation zurückzuführen sind, von den Fahrern als störender bewertet werden als solche, die durch Grenzen der Sensorik begründet sind. Die meisten Fahrer bewerten das frühe Bremsen des ACC-Systems in Überholsituationen, sowie das Rechtsüberholen als besonders störend. Für eine detaillierte Analyse der Fahrerverhaltensänderungen werden im Folgenden objektive Merkmale auf Grundlage der Messdaten ausgewertet.

### 3.7 Fahrerverhaltensänderung – objektive Ergebnisse

Für die Auswertung des erheblichen Messdatenvolumens wurde eine automatisierte Auswerteroutine entwickelt. Hierdurch ist ein fester Ablauf von den Rohdaten bis hin zu den

fertigen Ergebnisdaten gewährleistet. Dies ist insbesondere in Hinblick auf die zweite Probandenstudie mit dem ACC mit Spurwechselunterstützung (vgl. Kap. 5) von großer Wichtigkeit, da so gewährleistet ist, dass beide Studien identisch ausgewertet werden. Dadurch kann sichergestellt werden, dass keine methodischen Fehler zwischen den Ergebnissen der beiden Fahrstudien bestehen und die Ergebnisse direkt zu einander verglichen werden können.

Zur Datenaufzeichnung wurde das Automotive Data and Time Triggered Framework (ADTF), eine Eigenentwicklung der Audi Electronics Venture GmbH, eingesetzt. Hauptaufgabe des ADTF ist das Sammeln und Verwalten von Daten und deren zeitliche Synchronisierung zu einander. Die Bilddaten der LKA-Kamera wurden mit 5 Frames pro Sekunde zur Dokumentation der Fahrszene erfasst. Bei den CAN-Bus-Daten wurden die gesamten Sensordaten der Einzelsensoren sowie Fahrzeugdaten und die prädiktiven Streckendaten mit ihren jeweiligen Zykluszeiten aufgezeichnet. Für die Auswertung wurde die Datenbasis beschränkt auf Fahrten auf der Autobahn, d.h. Abfahrvorgänge oder auch Standzeiten an Ampeln oder Stauphasen wurden manuell entfernt.

Anschließend erfolgte eine Reduzierung dieses Datenstroms auf die wesentlichen, für die Auswertung, erforderlichen Daten. Über ein geeignetes Interface wurden die Daten dann in eine eigens entwickelte MATLAB-Auswerterroutine eingelesen. Ein anschließender Resampling- und Restrukturierungsprozess überführte die Daten in ein einheitliches Format, in dem dann die automatisierte Extraktion der untersuchten Merkmale durchgeführt wurde. Bild 3.11 zeigt den Prozess der automatisierten Auswertung.

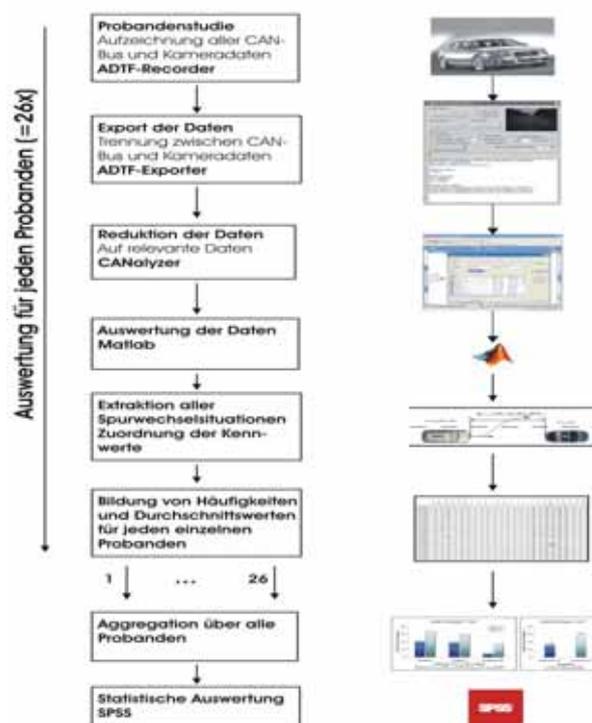


Bild 3.11: Prozess der automatisierten Datenauswertung

Die Schwierigkeit bei der Auswertung der Spurwechselsituationen bestand dabei darin, dass diese zeitlich betrachtet zufällig in jedem Messfile für jeden Probanden aufgetreten sind. Im ersten Auswerteschritt wurden deshalb alle Spurwechselzeitpunkte aus den Daten durch eine Auswertefunktion ermittelt. Relativ zu diesen Spurwechselzeitpunkten wurden dann im zweiten Schritt die relevanten Merkmale, wie z.B. die Spurwechselfdauer, ermittelt. Anschließend wurden Häufigkeiten oder Durchschnittswerte über alle Merkmale für jeden Probanden einzeln ermittelt, sowohl für die Fahrt ohne ACC als auch für die Fahrt mit ACC. Hieraus wurde für jeden Probanden ein eigenes Profil bezüglich seines Spurwechselverhaltens angelegt. Anschließend erfolgte eine Aggregation über alle Probanden. Mit Hilfe der im Anhang A beschriebenen statistischen Methoden wurden erwartete Korrelationen ermittelt und die Hypothesen geprüft. Für alle Ergebnisse wurde ein Signifikanzniveau von  $p=0,05$  gewählt.

### **3.7.1 Ergebnisse der Messdatenauswertung**

Um erkannte Änderungen des Fahrverhaltens mit und ohne ACC differenzierter auswerten zu können, wurden die Probanden, wie Kap 3.5 beschrieben, nach dem Fahrertyp in die Kategorien sportlicher, moderater oder komfortabler Fahrer unterteilt. Die Beschreibung der ACC-Nutzung erfolgt über Kennwerte, die aus den gesamten Messdaten extrahiert wurden. Hierzu zählt, dass während der einstündigen Messfahrt bei 85% der Spurwechsel das ACC-System aktiv war. Im Mittel wurde das System im Verlauf der Messung 9-mal durch Bremsen deaktiviert. Daneben wurde durchschnittlich 14-mal per Gaspedal übertreten, was einem Anteil von ca. 15% innerhalb der Spurwechselsituationen entspricht. Bei der Geschwindigkeitswahl konnte eine Differenzgeschwindigkeit von ca. 8 km/h zwischen Wunschgeschwindigkeit und Ist-Geschwindigkeit festgestellt werden. Bei der Analyse der Fahrerübernahmeaufforderungen repräsentiert durch den Übernahmegong, zeigte sich, dass es in 62% der Fälle zu keiner Übernahmeaufforderung gekommen ist und sich die verbleibenden 38% auf ein bis maximal drei Übernahmeaufforderungen verteilen. Innerhalb dieser Merkmale konnten keine Abhängigkeiten vom Fahrstil für die Probanden gefunden werden. Im Folgenden werden die Merkmale betrachtet bei denen ein Einfluss zwischen der Fahrt mit und ohne ACC erwartet worden ist und dieser entweder bestätigt oder widerlegt werden konnte.

#### **3.7.1.1 Mittlere Fahrgeschwindigkeit**

Für die Berechnung der mittleren Fahrgeschwindigkeit wurde der Mittelwert der Geschwindigkeit während der kompletten Fahrstrecke auf der Autobahn gebildet.

Die Versuchsfahrt mit ACC dauerte im Mittel 58 Minuten und 32 Sekunden (STD: 3 Min), während die Fahrt ohne ACC im Durchschnitt 59 Minuten 17 Sekunden dauerte. Beide Messfahrten unterschieden sich in der Fahrzeit nur unwesentlich. Bedingt durch die Clusteranalyse ergeben sich bei der mittlere Fahrgeschwindigkeit folgende Ergebnisse: Komfortable Fahrer fahren wesentlich langsamer als die beiden anderen Gruppen. In dieser Untergruppe der Probanden besteht daneben auch ein signifikanter Unterschied in der

Geschwindigkeitswahl bei der Fahrt mit und ohne ACC. So fahren komfortable Fahrer mit ACC signifikant schneller (101,5 km/h) als ohne ACC (hier 93,2 km/h) (vgl. Bild 3.12).

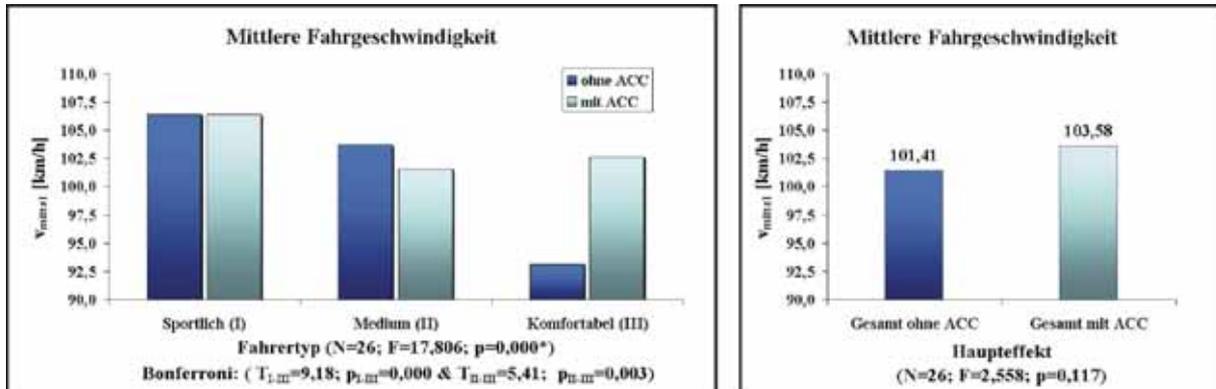


Bild 3.12: Veränderung der Durchschnittsgeschwindigkeit

### 3.7.1.2 Spurwechselhäufigkeit

Die Spurwechselhäufigkeit ist definiert als: Gesamtanzahl der Spurwechsel je Proband, bezogen auf die gefahrene Gesamtstrecke [Einheit 1/km], unabhängig von der Spurwechselklasse (siehe Kap. 3.7.1.8). Aus Bild 3.13 wird deutlich, dass sich die Spurwechselhäufigkeit aller Fahrertypen im ACC-Modus einem gemeinsamen Wert annähert.

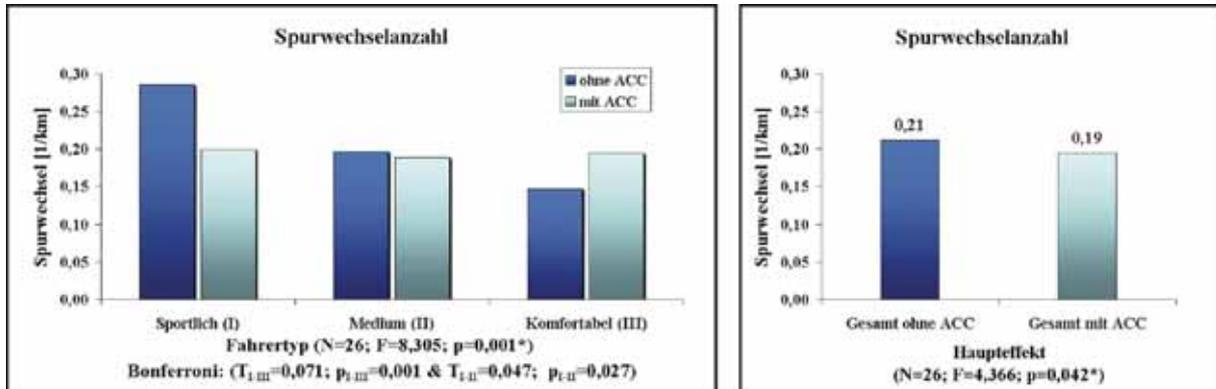


Bild 3.13: Veränderung der Spurwechselanzahl

Allerdings zeigt sich, bedingt durch die Fahrstilzuordnung über dieses Merkmal, dass sportliche Fahrer mit ACC wesentlich weniger Spurwechsel nach links ausführen als ohne ACC, während im Vergleich zu ihrem normalen Fahrverhalten komfortable Fahrer mit ACC sogar öfter überholen. Die Hypothese Nr. 3, dass sich die Spurwechselanzahl zwischen den Fahrten mit und ohne ACC signifikant unterscheidet, konnte insbesondere unter Berücksichtigung des Fahrstils bestätigt werden.

Eine mögliche Erklärung dafür, dass komfortable Fahrer ihre Spurwechselanzahl erhöhen, könnte sein, dass diese ihre Geschwindigkeit mit ACC bewusster wählen müssen und dass Abweichungen zwischen Wunsch- und Istgeschwindigkeit deutlicher wahrgenommen werden. Daraus folgt ein verändertes Spurwechselverhalten in der Form, dass in

Annäherungssituationen weniger Folgefahrtsituationen akzeptiert werden und die Spurwechselhäufigkeit erhöht wird. Außerdem könnte die Reduzierung des Fahrerworkloads durch ACC dazu beitragen, dass mehr Ressourcen beim Fahrer etwa für anstehende Spurwechselentscheidungen zur Verfügung stehen.

### 3.7.1.3 Ausscherabstand und Ausscherzeitlücke

Der Ausscherzeitpunkt ist hier definiert als der Zeitpunkt an dem mit der vorderen linken Fahrzeugecke die Spurmarkierung überfahren wird (Bild 3.14). Die Ausscherzeitlücke ist dann der Quotient aus dem Ausscherabstand zum Vorderfahrzeug ( $d_{\text{Ausscher}}$ ) und der Fahrzeugeigengeschwindigkeit ( $v_{\text{Ego}}$ ) zum Ausscherzeitpunkt.

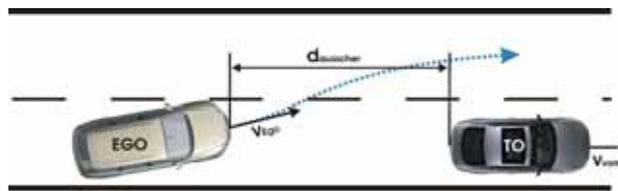


Bild 3.14: Definition der Ausscherzeitlücke

$$Tn_{\text{Ausscher}} = \frac{d_{\text{Ausscher}}}{v_{\text{Ego}}} \quad (3.1)$$

Bei der Analyse des Ausscherverhaltens wird deutlich, dass der Ausscherabstand größer wird, bzw. der Ausscherzeitpunkt nach vorne verlegt wird (siehe Bild 3.15). Der Zeitpunkt des Ausscherens mit ACC ist bei allen Fahrern, unabhängig vom Fahrstil, signifikant früher als ohne ACC, allerdings zeigt sich der Effekt bei sportlichen Fahrern am deutlichsten (Kruskal Wallis Test  $N=26$ ,  $\text{Chi}^2=11,48$ ,  $p=0,001^*$ )<sup>3</sup>.

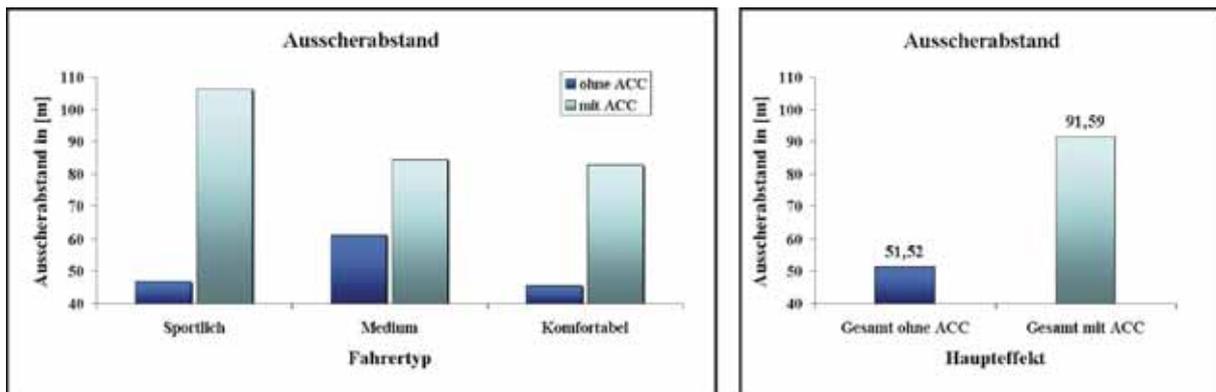


Bild 3.15: Veränderung des Ausscherabstandes

<sup>3</sup> Es musste ein Kruskal Wallis Test eingesetzt werden, da in der Datenbasis „frühe“ Spurwechsel mit enthalten waren, zu denen nur die Information „Abstand größer Sensorreichweite“ vorhanden war. Hieraus folgte ein nicht metrisches Bezugssystem und damit war eine Analyse über Mediane anstelle von Mittelwerten nötig, was wiederum als statistische Methode einen Kruskal Wallis Test anstelle einer Varianzanalyse erforderlich macht.

Die Antworttendenz aus dem Fragebogen, bei der Probanden angeben haben, mit ACC früher auszuscheren (vgl. Kap. 3.6), konnte somit bestätigt werden. Beide Ergebnisse unterstützen die Hypothese 1, dass sich diese Verhaltensänderungen erklären lassen aus den Lerneffekten der Fahrer im Umgang mit ACC, dass nämlich durch ein Ausscheren mit großem Abstand bei einem Spurwechsel frühe Bremsen des ACC-Systems vermieden werden können,

### 3.7.1.4 Ausscherdifferenzgeschwindigkeit

Die Ausscherdifferenzgeschwindigkeit ist definiert als die Differenz zwischen der Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs und der des Vorderfahrzeug zum Ausscherzeitpunkt [Einheit km/h] (siehe Bild 3.14).

$$v_{DiffAusscher} = v_{Ego} - v_{vorn} \quad (3.2)$$

Bei der Differenzgeschwindigkeit zum Zeitpunkt des Überfahrens der linken Fahrspurmarkierung konnte festgestellt werden, dass diese mit ACC signifikant niedriger als ohne ACC ist. Dieser Haupteffekt zeigt sich unabhängig vom Fahrstil (vgl. Bild 3.16). Generell gilt allerdings, dass sportliche Fahrer im Mittel mit höheren Differenzgeschwindigkeiten aussscheren.

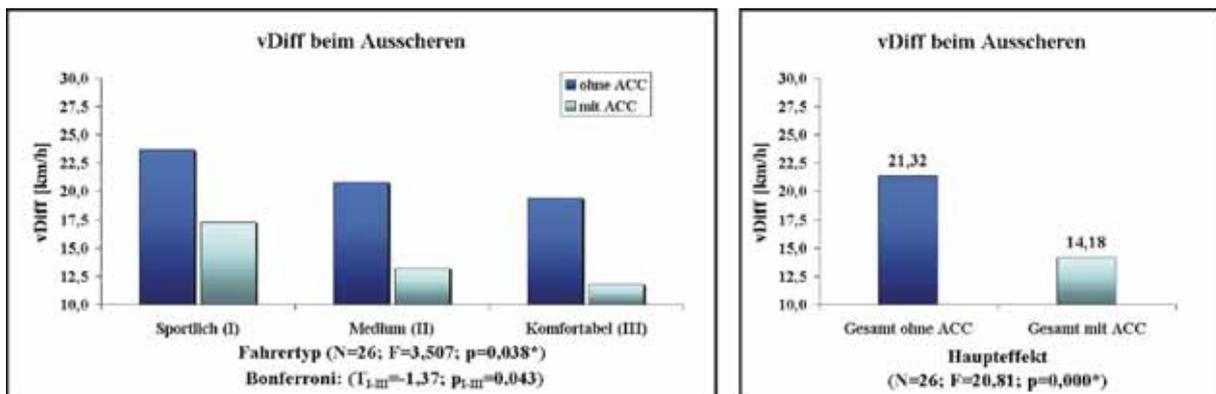


Bild 3.16: Veränderung der Ausscherdifferenzgeschwindigkeit

Die Hypothese Nr. 2, dass nicht erforderliche Bremsungen des ACC-Systems die Differenzgeschwindigkeit bei der Annäherung reduzieren, konnte somit bestätigt werden. Des Weiteren ist auch zu vermuten, dass im ACC-Betrieb Geschwindigkeitsdifferenzen durch den Fahrer bewusster wahrgenommen werden, da Abweichungen von Wunsch- und Istgeschwindigkeit unmittelbar an den resultierenden Beschleunigungen des ACC-Systems erkannt werden können. Dieser Umstand kann dazu führen, dass in der Fahrt mit ACC ein Spurwechsel eingeleitet wird, wohingegen in derselben Situation während der Fahrt ohne ACC kein Spurwechsel durchgeführt wird, sondern der Fahrer eine Folgefahrt akzeptiert.

### 3.7.1.5 Wechseldauer

Die Wechseldauer ist hier definiert als Zeitdifferenz zwischen dem Ausscherzeitpunkt und dem Zeitpunkt, an dem mit der hinteren rechten Ecke die Fahrspurmarkierung überfahren

wird (siehe Bild 3.17). Die so ermittelte Zeitdifferenz folgt hierbei der Definition nach [Sparmann 1978]. Diese Kennzahl beschreibt somit zwar nicht die Dauer des gesamten Manövers Spurwechsel, hat aber den großen Vorteil, dass beide Zeitpunkte direkt mit ortsfesten Punkten der Spurwechseltrajektorie verknüpft sind. Hierdurch ist die Vergleichbarkeit dieses Kennwerts zwischen den verschiedenen Spurwechselmanövern gegeben. Eine Aussage, wie lang das Zeitintervall ist, in dem sich das Fahrzeug auf beiden Fahrspuren befindet, ist über diese Kennzahl möglich.

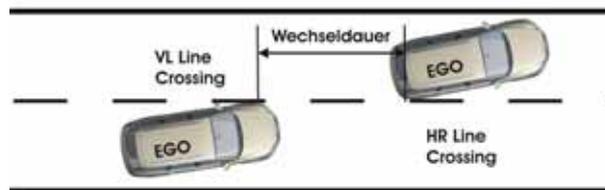


Bild 3.17: Definition der Wechseldauer

Ein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Wechseldauer mit und ohne ACC konnte nicht festgestellt werden. Im Mittel lag die hier ermittelte Dauer nach der oben genannten Definition mit ACC bei 1,78 s ohne ACC bei 1,82 s. Eine Abhängigkeit dieses Spurwechselparameters vom Fahrstil konnte nicht ermittelt werden (siehe Bild 3.18).

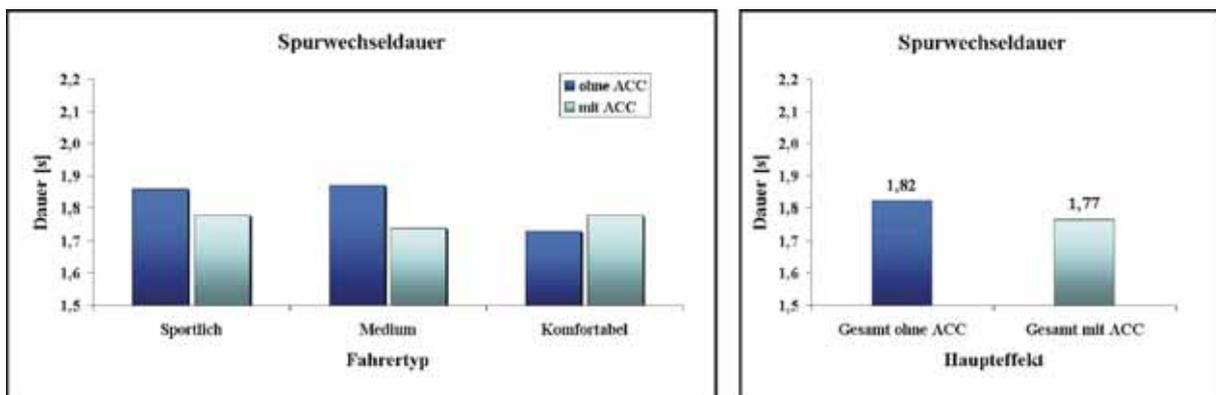


Bild 3.18: Veränderung der Wechseldauer

### 3.7.1.6 Fahrspurwahl

Die Fahrspurwahl ist definiert über den zeitlichen Anteil an der Gesamtfahrt, der auf der jeweiligen Fahrspur während der Fahrt auf der Autobahn verbracht worden ist. Bei zweispurigen Straßen erfolgt eine Einteilung in linke und rechte Fahrspur, bei dreispurigen Straßen in linke, mittlere und rechte Fahrspur (vgl. Bild 3.19).

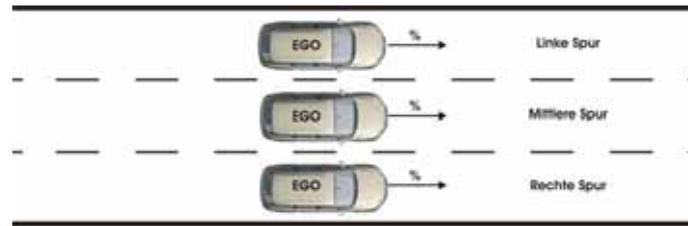


Bild 3.19: Definition der Fahrspurwahl

Aus der Veränderung des Spurwechselverhaltens resultiert direkt abhängig auch die Fahrspurwahl. Signifikant zeigt sich die verstärkte Nutzung der linken Fahrspur bei der Fahrt mit ACC. Am deutlichsten ist diese Veränderung bei moderaten bzw. komfortorientierten Fahrern festzustellen (vgl. Bild 3.20).

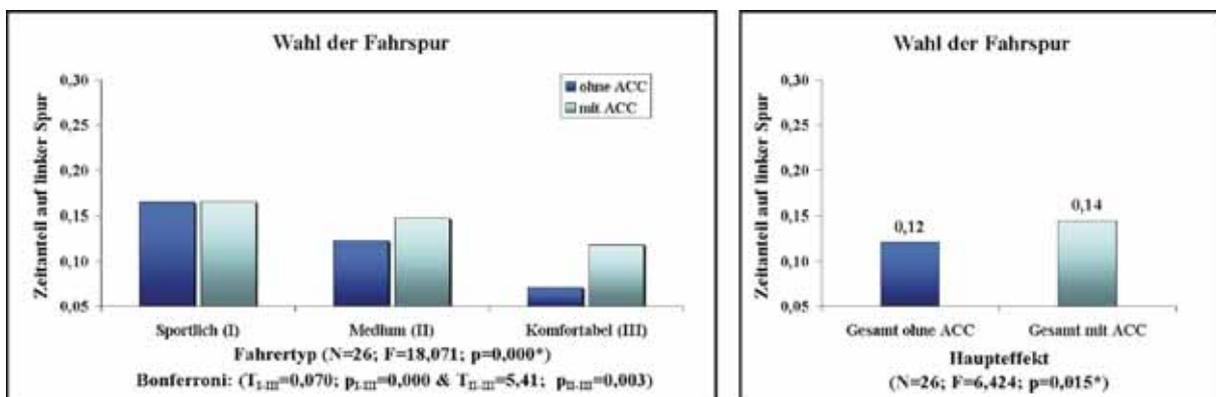


Bild 3.20: Veränderung in der Wahl der Fahrspur

Begründbar ist diese Veränderung dadurch, dass Fahrer ihr Spurwechselverhalten mit ACC an das Fahrerassistenzsystem adaptieren, indem sie die Fahrspur früher wechseln oder auf der linken Fahrspur bleiben, um ein Abbremsen des ACC-Systems zu vermeiden. Zusätzlich dazu wird der Anteil auf der linken Spur dadurch erhöht, dass eine Anpassung des Rückwechselverhaltens nach Rechts nach einem Überholmanöver erfolgt. So wird ein Spurwechsel nach rechts in engere Lücken von den Fahrern mit ACC vermieden, da das ACC der heutigen Generation hierbei erneut zu früh den Bremsvorgang einleitet.

### 3.7.1.7 Bremsungen >1,5 m/s<sup>2</sup>

Die Grundlage sind hierbei Bremsungen mit einer Verzögerung größer als 1,5 m/s<sup>2</sup>. Dieser Grenzwert ist als Kooperations- und Komfortschwelle bekannt, d.h. Verzögerungen größer als 1,5 m/s<sup>2</sup> werden vom Fahrer als sehr unkomfortabel bis gefährlich eingestuft (vgl. z.B. [Sparmann 1978], [Ehmanns 2002]). Bei der Auswertung der Fahrten ohne ACC werden alle Bremsungen mit dieser Spezifikation erfasst. Bei der ACC-Fahrt wird die Kombination aus Fahrer indizierten und durch ACC ausgelösten Bremsungen zusammengefasst, da der Fahrer jederzeit per Bremspedal die Fahrsituation übernehmen kann. Nach dieser Definition traten bei der Messfahrt ohne ACC durchschnittlich 10 Bremsungen auf, bei der Fahrt mit ACC erhöht sich die Anzahl signifikant und unabhängig vom Fahrstil auf 15 Bremsungen. Die Hypothese Nr.4 konnte somit bestätigt werden.

Im Detail sind systematische Unterschiede innerhalb des Fahrstils zwischen komfortablen, normalen und sportlichen Fahrern festzustellen. Komfortable Fahrer vermeiden generell, sowohl während Fahrten mit ACC als auch ohne ACC, starke Bremsungen (siehe Bild 3.21).

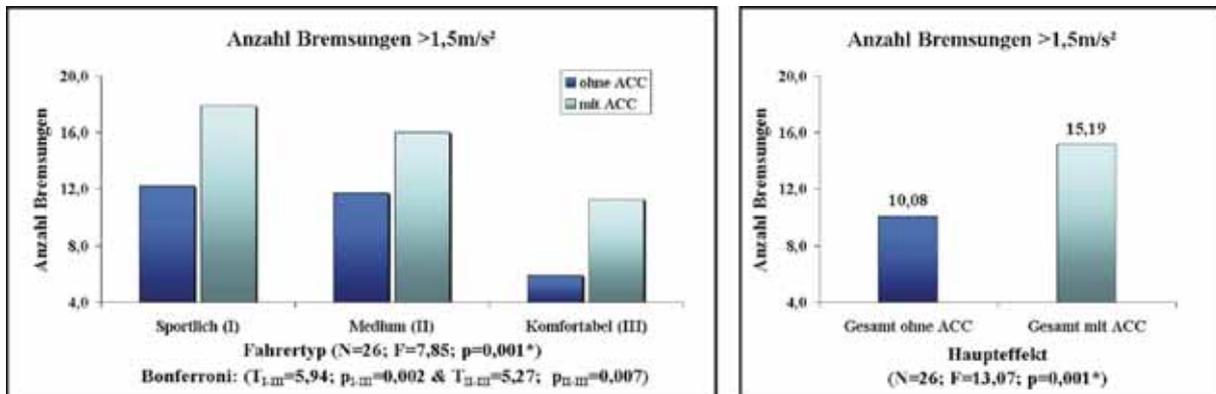


Bild 3.21: Veränderung des Bremsverhaltens

Auch die Hypothese Nr. 6, dass ACC weniger vorausschauend reagiert als ein menschlicher Fahrer konnte bestätigt werden. Hierfür ist die mangelnde Antizipation der bevorstehenden Situation durch das System, insbesondere bei Einscherersituationen, schnellen Annäherungen mit später Detektion des vorausfahrenden Fahrzeugs und unnötiges Bremsen im Verlauf von Annäherungen mit nachfolgendem Spurwechsel verantwortlich.

### 3.7.1.8 Spurwechselklassen

Zur Überprüfung, ob eine Änderung hin zu einem größeren Folgeanteil und zu weniger flüssigen Spurwechseln erfolgt ist, wurden alle Spurwechsel in sechs verschiedene Spurwechselklassen eingeteilt. Die Klassifizierung erfolgte hierbei manuell durch Analyse der Videoaufzeichnungsdaten. Folgende Klassifikation (Tabelle 3.2) wurde vorgenommen:

Früher Spurwechsel	Navigations-spurwechsel	Einfädelhilfe-spurwechsel
Annäherungs-spurwechsel	Folgefahrt-spurwechsel	Unmotivierter Spurwechsel

Tabelle 3.2: Einteilung in Spurwechselklassen

Frühe Spurwechsel (Bild 3.22) sind dadurch gekennzeichnet, dass in den Videodaten ein Vorderfahrzeug als Auslöser für den Spurwechsel zu sehen ist, dieses aber in der Objektliste des Radarsensors nicht vorhanden ist. Dieser Fall tritt auf, wenn der Spurwechsel vor dem Erreichen der aktuellen Sensorreichweite (< 180 m) begonnen wurde.

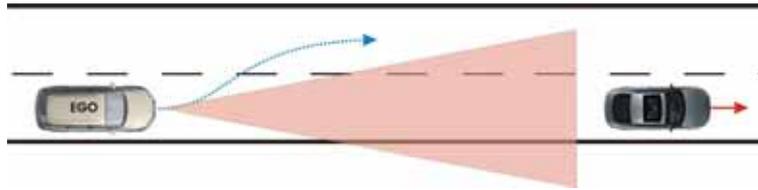


Bild 3.22: Früher Spurwechsel

Spurwechsel aufgrund von Navigation (Bild 3.23) lassen sich durch Auf- oder Abfahren oder einen Wechsel der Autobahn zuordnen. Der Zeitpunkt, an dem der Versuchsleiter den Probanden angewiesen hat, z.B. die Autobahn zu verlassen, ist in den Daten durch den Versuchsleiter während der Fahrt markiert worden. Hieraus können Spurwechsel aus Navigationsgründen eindeutig identifiziert werden.

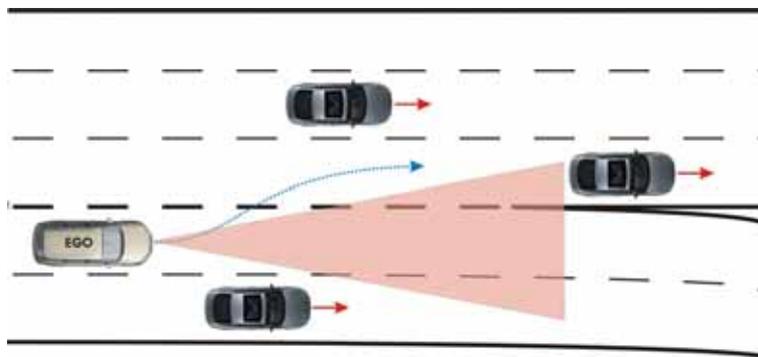


Bild 3.23: Navigationsspurwechsel

Die Klassifikation von Kooperationsspurwechseln zur Unterstützung von einfädelnden Fremdfahrzeugen (Bild 3.24) an Autobahnauffahrten erfolgte durch Videoauswertung. Hierbei wurden Spurwechsel ohne Vorderfahrzeug, bei denen ein einfädelndes Fahrzeug im Bereich der Autobahnauffahrt zu sehen war, berücksichtigt.

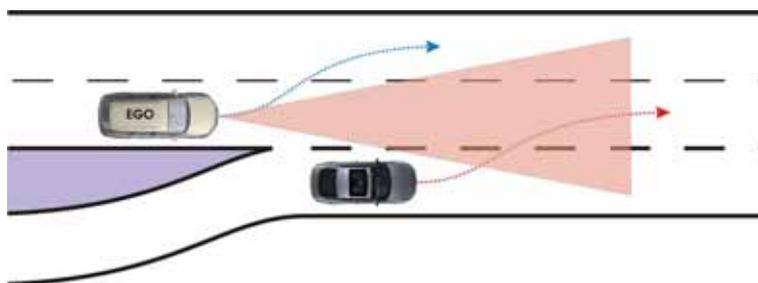


Bild 3.24: Einfädelhilfe Kooperationsspurwechsel

Einen Großteil aller Spurwechsel macht die Klasse der Annäherungsspurwechsel (Bild 3.25) aus. Hierbei ist der Fahrer durch ein langsames, vorausfahrendes Fahrzeug motiviert, die Spur zu wechseln. Wichtig für die Klassifikation ist ferner, dass es sich um eine Annäherungssituation handelt, aus der der Fahrer das vorausfahrende Fahrzeug ohne Folgefahrt flüssig überholt, somit also eine deutliche Differenzgeschwindigkeit zum Vorderfahrzeug besteht.

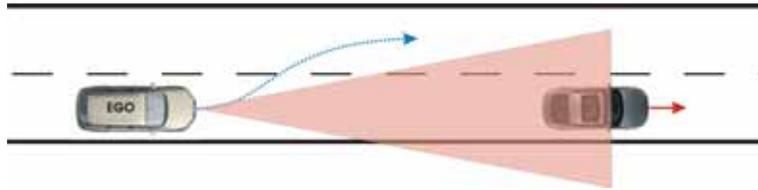


Bild 3.25: Annäherungsspurwechsel

Folgespurwechsel sind dadurch gekennzeichnet, dass der Fahrer dem vorausfahrenden Fahrzeug für eine Zeit folgt und dieses dann überholt. Charakteristisch hierfür ist die sehr geringe Geschwindigkeitsdifferenz zwischen dem Ego-Fahrzeug und dem Vorderfahrzeug. Häufig sind daneben auch leichte Verzögerungen während der Annäherungsphase festzustellen um z.B. ein schnelleres Fahrzeug auf der Überholspur noch passieren zu lassen (vgl. Bild 3.26). Außerdem sind in dieser Spurwechselklasse auch solche Spurwechsel zusammengefasst, in denen das Ego-Fahrzeug in direktem Verbund mit dem Vorderfahrzeug ein weiteres, davor fahrendes Fahrzeug überholt und keine Daten dieses eigentlich für den Spurwechsel relevanten Fahrzeugs durch den Sensor existieren (vgl. Bild 3.27).

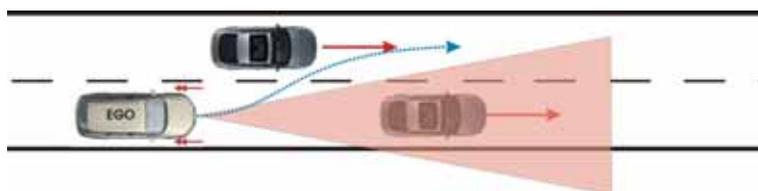


Bild 3.26: Spurwechsel mit Folgephase

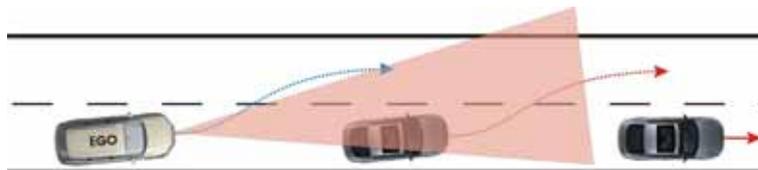


Bild 3.27: Spurwechsel mit Führungsfahrzeug

Abschließend bleibt noch die Klasse der unmotivierten oder nicht einteilbaren Fälle (Bild 3.28). Hierbei wurden Spurwechsel zusammengefasst, bei denen keine der oben genannten Klassen anwendbar war. Sehr vereinzelt aufgetretenes ausgeprägtes Pendeln innerhalb einer Fahrspur mit Berühren bzw. Überfahren der Spurmarkierung, das fälschlicherweise als Spurwechsel klassifiziert wurde, ist auch in diese Kategorie mit aufgenommen.

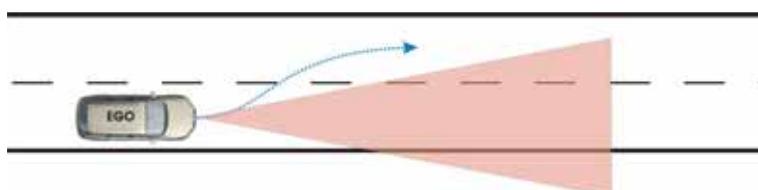


Bild 3.28: Unmotivierter Spurwechsel

Unabhängig vom Fahrstil werden bei der ACC-Fahrt systematisch mehr frühe Spurwechsel durchgeführt (N=26; F=10,62; p=0,002\*). Waren es ohne ACC durchschnittlich noch 5,54 frühe Spurwechsel pro Messfahrt, erhöht sich die Anzahl auf 8,19 mit ACC. Die Hypothese Nr. 7, dass ACC zu früheren Ausscherzeitpunkten führt, kann somit bestätigt werden. Verantwortlich für diese Verhaltensadaptionen sind Lerneffekte des Fahrers zur Vermeidung nicht erforderlicher Bremsungen vor Spurwechseln (vgl. Bild 3.29).

Hinsichtlich der Navigationsspurwechsel zeigen sich keine signifikanten Unterschiede. Dies entspricht dem Erwartungswert, da die Anzahl der Navigationsspurwechsel nur von der Fahrtroute abhängt und diese in der Messfahrt mit und ohne ACC identisch war.

Während der ACC-Fahrt wurden geringfügig mehr Spurwechsel an Autobahnauffahrten zur Kooperation durchgeführt, die jedoch signifikant sind (N=26; F=4,18; p=0,047\*).

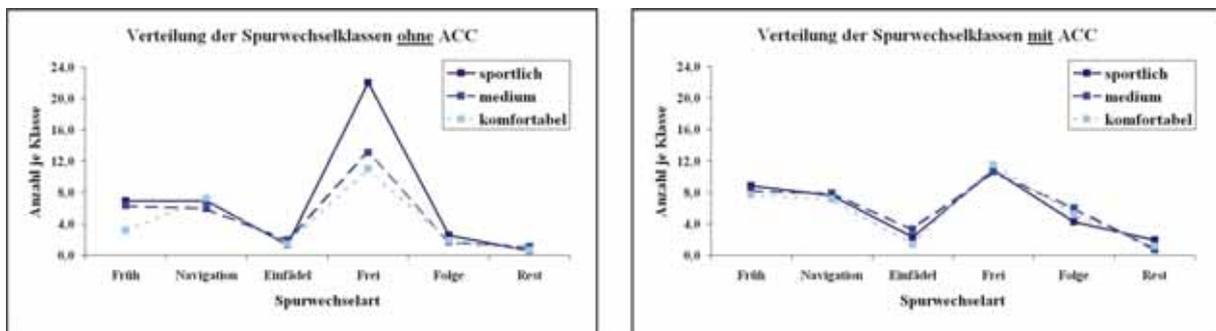


Bild 3.29: Verteilung der Spurwechselklassen

Bei den Annäherungsspurwechseln, in denen ein Fahrzeug direkt im Verlauf der Annäherung überholt wird, zeigt sich für alle Fahrer, dass mit ACC die Zahl dieser Spurwechsel signifikant abnimmt (N=26; F=12,42; p=0,001\*). Dabei zeigt sich innerhalb der Baseline-Fahrt, dass sportliche Fahrer diese Spurwechselsituation häufiger durchfahren als komfortable oder moderate Fahrer. Hinzu kommt bei dieser Gruppe und den moderaten Fahrern, dass sich die Zahl der Annäherungsspurwechsel signifikant und sehr deutlich um 51% respektive 20% (Bonf. T=5,14; p=0,006 (I) & Bonf. T=4,56; p=0,012) zwischen der Fahrt mit und ohne ACC reduziert. Zurückzuführen sind diese Änderungen des Fahrverhaltens insbesondere auf eine ausgeprägte Bereitschaft, mit ACC dem Vorderfahrzeug zu folgen. Aus dieser deutlichen Abweichung lässt sich die Unzufriedenheit der Fahrer mit dem System ableiten, die auch in der Fragebogenauswertung Kap 3.6 aufgezeigt werden konnte.

Korrespondierend mit der Abnahme der Annäherungsspurwechsel nimmt in der ACC-Fahrt die Zahl der Folgefahrt-Spurwechsel signifikant zu. Waren es in der Fahrt ohne ACC durchschnittlich noch 2,04 Folgefahrt-Spurwechsel, steigt diese Zahl auf durchschnittlich 5,15 Spurwechsel mit ACC an (N=26; F=22,21; p=0,000\*). Dies bestätigt wiederum die Hypothese Nr. 7, dass ACC das Fahrverhalten verändert und Folgesituationen verstärkt vom Fahrer akzeptiert werden.

Innerhalb der Gruppe der unmotivierten oder nicht-klassifizierbaren Spurwechsel bestehen keine signifikanten Unterschiede.

Generell zeigt sich, dass ACC die fahrstilspezifischen Unterschiede innerhalb der Verteilung der Spurwechselklassen ausgleicht. Konkret heißt das, dass alle Fahrer ihr Fahrverhalten, unabhängig von ihrem Fahrstil, deutlich an ein mit ACC mögliches Verhalten anpassen.

### 3.8 Korrelation von Fragebogen und Messdaten

Die Korrelation der Ergebnisse von Messdaten- und Fragebogenauswertung wurde aus verschiedenen Gründen durchgeführt. Zum ersten erlaubt diese Korrelation eine Aussage darüber, ob die subjektiven Empfindungen aus dem Fragebogen mit den objektiven Messdaten übereinstimmen. Hieraus ist direkt ableitbar, ob die Fahrer die objektiv aufgetretenen Verhaltensänderungen auch wahrgenommen haben. Außerdem erhöhen vorhandene Korrelationen das Vertrauen in die Qualität der Aussagen aus dem Fragebogen, da zu schließen ist, dass auch Fragen, in denen kein direktes objektives Merkmal passend zu einem subjektiven Merkmal existiert, sinnvoll interpretiert werden können.

Ergebnisse objektive vs. subjektive Einschätzung:

- Probanden, die ihre Überholhäufigkeit mit ACC in der Fragebogenauswertung als herabgesetzt empfinden, zeichnen sich dadurch aus, dass sie in der Fahrt ohne ACC einen geringeren Ausscherabstand wählen als in der Fahrt mit ACC (Korr. Spearman;  $r=-0,429$ ;  $p=0,036^*$ ;  $N=24$ ). Das heißt, die durch das ACC hervorgerufene Veränderung, dass mit größerem Abstand der Spurwechsel begonnen wird, wird vom Fahrer wahrgenommen.
- Der größte Teil der Probanden 88% gibt im Fragebogen an teilweise oder immer ACC im Verlauf eines Spurwechsels mit dem Gaspedal zu übertreten. Dies spiegelt sich direkt in den Messdaten wider, da diese Fahrer während des Überholvorgangs tatsächlich häufig übertreten (Korr. Spearman;  $r=0,551$ ;  $p=0,005^*$ ;  $N=24$ ).
- Als besonders störend wird empfunden, wenn ACC bei der Annäherung an ein langsames Fahrzeug bremst und dadurch das Überholen verzögert (81,8%). Insbesondere Probanden, die ohne ACC mehr Spurwechsel initiieren, haben dies als störend empfunden. Fahrer hingegen, die ohne ACC weniger Spurwechsel initiiert haben, fühlten sich dadurch weniger gestört (Korr. Spearman;  $r=0,504$ ;  $p=0,012^*$ ;  $N=24$ ).
- Fahrer, die im Fragebogen angeben, mit ACC früher auszuscheren, weisen in den Messdaten eine erhöhte Zahl von frühen Spurwechseln auf (Korr. Spearman;  $r=0,450$ ;  $p=0,027^*$ ;  $N=24$ ).

- Fahrer, die bei der Fahrt mit ACC eine erhöhte Zahl von manuellen und Systembremsungen  $>1,5\text{m/s}^2$  erlebt haben als in der Fahrt ohne ACC, äußern, dass ACC nicht ihrem normalen Fahrverhalten (Korr. Spearman  $r=0,640$ ;  $p=0,001^*$ ;  $N=24$ ) und auch nicht ihrem Verhalten in Annäherung im Verlauf des Überholens (Korr. Spearman;  $r=0,471$ ;  $p=0,020^*$ ;  $N=24$ ) entspricht.

Aus den Erkenntnissen aus dem Fragebogen und der Auswertung der objektiven Merkmale aus den Messdaten wird deutlich, dass das Fahrverhalten deutlich durch die Nutzung von ACC beeinflusst wird. Die Korrelationen zwischen Messdatenauswertung und Fragebogenauswertung im Bereich der Veränderung des Spurwechselverhaltens zeigen anschaulich, dass Veränderungen existieren, diese bewusst vom Fahrer wahrgenommen und als störend bewertet werden. Mit diesen Ergebnissen des ersten Fahrversuchs lässt sich die Forderung aus Kapitel 2.3 nach einem verbesserten, situationsadaptiven ACC untermauern.

## 4 Situationsadaptives, fahrerzentriertes ACC in Spurwechselsituationen

Die Auswertung der Probandenstudie in Kapitel 3 hat ergeben, dass Spurwechselsituationen mit heutigen ACC-Systemen nur unzureichend unterstützt werden. Belegt werden kann dies durch die im Fragebogen geäußerte Kritik und die direkt messbaren Fahrerhaltensänderungen in Spurwechselsituationen. Dass die Probanden ihr Spurwechselverhalten mit einem normalen ACC bewusst ändern, konnte in Kap. 3.7 anhand von Merkmalen wie einem früheren Spurwechselzeitpunkt, einer veränderten Spurwechselhäufigkeit, reduzierten Ausscherdifferenzgeschwindigkeiten und dem Ansteigen ungerechtfertigter Bremseneingriffe gezeigt werden. Das Verhalten von Mensch und System weicht hierbei aufgrund der unterschiedlichen Situationsrepräsentation und dem daraus abgeleiteten Verhalten, wie Kap. 2.3 erwartet, deutlich voneinander ab. Ein normales nicht vernetztes ACC-System unterliegt in seiner technischen Auslegung in Spurwechselsituationen einem Dilemma, das treffend bei [Bosch 2002] auf den Punkt gebracht wird:

*„Die Überholwahrscheinlichkeit steigt mit höherer Differenzgeschwindigkeit und kann erst in unmittelbarer Nähe zum Zielobjekt eindeutig bestätigt werden. Dadurch entsteht ein Zielkonflikt: bei hoher Differenzgeschwindigkeit ist einerseits eine frühe Reaktion notwendig, andererseits ist gerade in diesem Fall die Überholwahrscheinlichkeit recht hoch und damit eine frühe Verzögerung unerwünscht.“ [Bosch 2002]*

Um diesen Zielkonflikt für zukünftige ACC-Systeme auflösen zu können, wird in dieser Arbeit die Funktion Spurwechselunterstützung auf Basis der vernetzten Fahrerassistenzsysteme ACC, LCA, und LKA entwickelt. Diese soll dem Fahrer durch eine situationsadaptive Reglerreaktion in Überholsituationen ein flüssigeres Fahren ermöglichen und unnötige ACC-Bremsungen vermeiden. Die Längsbeschleunigung bei einer Annäherung mit anschließendem Spurwechsel wird also auf positive Beschleunigungen bis minimal  $0 \text{ m/s}^2$  begrenzt. Speziell in Annäherungssituationen sollen mit Hilfe der vernetzten FAS unnötige Bremsreaktionen durch eine verbesserte Situationsanalyse vermieden werden (vgl. Patentanmeldungen [Freyer et al. 2006] und [Freyer et al. 2007]). Insgesamt soll durch diese Funktionsverbesserung von ACC erreicht werden, dass sich das Fahrverhalten mit ACC wieder näher in Richtung des „normalen“ Fahrverhaltens zurückentwickelt und die Akzeptanz beim Kunden durch ein intuitives Systemverhalten steigt. Im Folgenden wird zunächst ein kurzer Überblick über bestehende Ansätze aus der Spurwechselanalyse gegeben. Daran schließt sich eine Anforderungsanalyse und eine Bestandsaufnahme bezüglich der verfügbaren Sensorik an, bevor die entwickelte Funktion Spurwechselunterstützung ausführlich vorgestellt wird.

## **4.1 Bisherige Ansätze zur Spurwechselmodellierung**

Die Situation Spurwechsel im Straßenverkehr stand in vielen Untersuchungen im Mittelpunkt, allerdings mit sehr unterschiedlichen Fragestellungen und Zielsetzungen. Viele Untersuchungen und Analysen beschäftigten sich mit der Voraussage einer Spurwechselabsicht oder mit Interaktionsprozessen zwischen dem spurwechselnden Fahrzeug und dem umgebenden Verkehr (vgl. [Ehmanns 2002], [Ahmed 1999]). Häufig wurden zu diesem Zweck Motivationsmodelle auf Basis von Zufriedenheitswerten erstellt (vgl. [Kopf 1993], [Sparmann 1978], [Irmscher 2001] oder [Fastenmeier et al. 2001]). In diesem Kontext wurden auch fahrerspezifische Merkmale wie persönliche Abneigungen, unterlagerte Motive wie z.B. vorhandener Zeitdruck mit untersucht. Innerhalb der Untersuchungen kann in mikroskopische Untersuchungen zur Analyse des Fahrerhaltens eines einzelnen Fahrers und in makroskopische Untersuchungen, bei denen der Verkehrsfluss und Interaktionsprozesse im Mittelpunkt stehen, unterschieden werden. Neben diesen Ansätzen zur Prädiktion von Spurwechseln und zur Bildung von Fahrermodellen gibt es viele Untersuchungen zur Spurwechselrekonstruktion (vgl. [Olsen et al. 2002], [Runkel 1969], [Weiss 1988], [Spindler 1962], [Sporrer et al. 1998], [Burg & Rau 1981]). Diese wurden hauptsächlich durchgeführt, um entstandene Spurwechselunfälle analysieren und bewerten zu können. Im Mittelpunkt standen hierbei insbesondere die Bahnkurve während des Spurwechselforgangs und ihre mathematische Beschreibung sowie die fahrdynamische Analyse bezüglich der aufgetretenen Zustandsgrößen. Im Besonderen wurden häufig die zeitliche und räumliche Vermeidbarkeit der entstandenen Unfälle sowie letztmögliche Ausweichpunkte analysiert. Intensiv wurden hierbei Fehler im Wahrnehmungs-, Interpretations- und Entscheidungsprozess, die zum Unfall geführt haben, analysiert.

## **4.2 Anforderungen an die Sensorik vernetzter FAS**

Um das ACC so zu verbessern, dass ein möglichst natürliches Spurwechselverhalten möglich wird, sind zunächst die Unterschiede zu beschreiben, die zwischen den dem Fahrzeug aus den Sensoren zu Verfügung stehenden Umfeldinformationen und den vom Menschen aufgenommenen Informationen bestehen.

Die Spezifikation der Sensorik wurde in Kap. 3.4.1 innerhalb der Beschreibung des Versuchsträgers vorgestellt. In diesem Kapitel werden, bezogen auf die vernetzte Funktion Spurwechselunterstützung im ACC-System, Anforderungen an die Sensorik aufgezeigt und mit den zur Verfügung stehenden Sensorinformationen abgeglichen. Bei der ACC-Sensorik beeinflusst insbesondere der geringe Öffnungswinkel die Funktion. Bild 4.1 zeigt die geringe Abdeckung der Nebenspuren im Nahbereich.

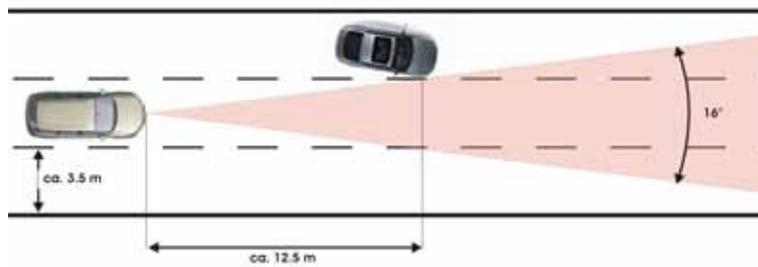


Bild 4.1: Öffnungswinkel des ACC-Sensors

Diese Einschränkung wirkt sich insbesondere dann aus, wenn sich Fahrzeuge bei einer anstehenden Spurwechselentscheidung im Nahbereich auf der Zielspur befinden. In diesen Situationen können existierende Fahrzeuge trotz der Vernetzung der Systeme nicht zuverlässig erkannt werden. Somit weicht die technische Situationsrepräsentation von der vergleichbaren menschlichen ab. Die Antizipation der entstehenden Verkehrssituation ist hier für das ACC eingeschränkt. Mit einem geeigneten Tracking der umgebenden Fahrzeuge können die Folgen dieser Einschränkung des Radarsensors jedoch weitgehend kompensiert werden. ACC-Stop-and-Go Systeme verwenden zusätzliche Sensoren zur Nahbereichsüberwachung, so dass diese Einschränkung nur noch temporär bestehen wird.

Daneben bestehen auch Einschränkungen in der LKA-Sensorik. Diese liefert zuverlässige Daten über die Egofahrspur. Darüber hinaus wären auch Daten, z.B. über die Fahrspurbreite der Zielspur, für einen Spurwechsel relevant, um den zu überwindenden Weg in lateraler Richtung präzise voraussagen zu können. Bei dem eingesetzten System stehen diese Informationen nicht zur Verfügung. Da auch der Mensch diese Information nur schätzen kann und die Zielspur in der Regel dieselbe Breite aufweist wie die aktuell genutzte Spur, wird für die weitere Umsetzung der Funktion mit der Modellvorstellung gearbeitet, dass die ermittelten Geometriedaten der Startspur direkt auf die Zielspur übertragen werden können.

Bei der Rückraumbetrachtung durch das LCA-System liegen Abweichungen zwischen der menschlichen Wahrnehmung und den Sensordaten im eingeschränkten Sichtbereich der Sensoren direkt neben dem Fahrzeug sowie der eingeschränkten Sichtweite vor. Die Lücke neben dem Fahrzeug kann erneut durch ein geeignetes Tracking geschlossen werden. Ein größeres Problem stellt der mit ca. 50 m deutlich beschränkte Sichtbereich nach hinten dar. Dieser führt insbesondere bei nachfolgenden Fahrzeugen mit hoher Differenzgeschwindigkeit zu einer zu späten Detektion und damit zu einer Systemreaktion, die nicht das reale Fahrerverhalten in diesen Fahrsituationen widerspiegelt. Für die Spurwechselunterstützung muss dieser Umstand als Unsicherheit in der Verkehrssituation mitberücksichtigt werden.

Zusammenfassend zeigt sich für alle Sensoren der ACC-, LCA- und LKA-Systeme, dass im Erfassungsbereich und der Antizipation von Situationen der aufmerksame Mensch den heutigen Sensoren deutlich überlegen ist. Lediglich in der absoluten Präzision der Zustandsgrößen haben die Sensoren Vorteile gegenüber der menschlichen Wahrnehmung. So werden Abstände oder Relativgeschwindigkeiten exakt gemessen, während diese vom Menschen, insbesondere bei großen Entfernungen, mit einer großen Unsicherheit über Hilfsgrößen nur abgeschätzt werden können.

### 4.3 Situationsadaptives, fahrerzentriertes ACC – Funktion

#### Spurwechselunterstützung

Durch die Vernetzung von ACC mit LKA und LCA wird es möglich, das Reglerverhalten des ACC-Systems abhängig von der vorliegenden Verkehrssituation anzupassen und so ein besseres, fahrertypisches Verhalten zu erreichen. Hierbei wird in jeder Annäherungssituation unter Nutzung der Informationen aller vernetzten Fahrerassistenzsysteme geprüft, ob ein Überholmanöver möglich ist und vom Fahrer gewünscht wird. Für eine stabile Prädiktion ist es erforderlich, die komplexe Fahrsituation Spurwechsel in einzelne handhabbare Teilfunktionen zu zerlegen. Wichtig ist, dass allen Einzelentscheidungen in den jeweiligen Spurwechselphasen eine einheitliche und konsistente Situationsrepräsentation zu Grunde liegt. Die Struktur der Funktion SWU spiegelt hierbei den Entscheidungsprozess des Menschen während der verschiedenen Phasen eines Spurwechsels wider. Deshalb werden die einzelnen Funktionsmodule kaskadenförmig angeordnet und seriell abgearbeitet. Parallel dazu existieren Peripheriemodule, die die Funktionsmodule zu jeder Zeit mit vorverarbeiteten Hilfsgrößen sowie Historienwerten der relevanten Entscheidungsmerkmale versorgen. Bild 4.2 zeigt die stark vereinfachte Struktur der SWU Funktion.

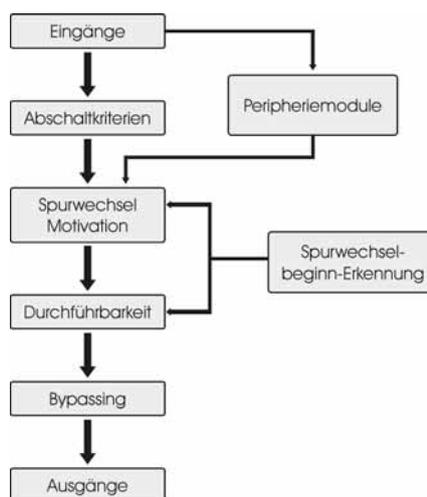


Bild 4.2: Struktur der Spurwechselunterstützungsfunktion

Die Peripheriemodule übernehmen die Aufgabe, aus der Flut der Sensorinformation die relevanten Informationen zu bündeln und zu extrahieren. Der hier modellierte Prozess der Informationsgewinnung entspricht im Wesentlichen der menschlichen Informationsverarbeitung (vgl. [Kopf 1993]). Dabei schaffen diese Module aus den zur Verfügung stehenden Sensordaten Hilfsgrößen wie z.B. die TTC oder  $T_n$ , auf deren Basis der Mensch seine Entscheidungen trifft (vgl. [Färber 1986], [Irmscher 2001], [Lee 1976] [van der Horst 1990], [van Winsum & Heino 1996]). Daneben erfolgt hier eine Situationsklassifikation in die nach [Sparmann 1978] benannten Spurwechselsituationen Lead (Spurwechsel mit Vorderfahrzeug) Lag (Spurwechsel mit Hinterfahrzeug) Gap (Spurwechsel mit Vorder- und Hinterfahrzeug) Free (keine umgebenden Fahrzeuge). Eine detaillierte Beschreibung dieser Peripheriemodule ist in Kap. 4.3.1 zu finden.

In den Funktionsmodulen Abschaltkriterien, Spurwechselmotivation, Durchführbarkeit und Spurwechselbeginn-Erkennung wird der Prozess der menschlichen Entscheidung für einen Spurwechsel modelliert. Grundlage ist hierbei ein hybrider Ansatz aus motivationsbasierter und regelbasierter Fahrermodellierung. Das erste Funktionsmodul „Abschaltkriterien“ überprüft die Verfügbarkeit und Güte aller vernetzten Fahrerassistenzsysteme und führt eine rudimentäre Entscheidung durch, ob eine relevante Fahrsituation überhaupt entstehen kann. Nachfolgend wird auf Basis der Situationsklassifikation ermittelt, ob ein Spurwechselwunsch wahrscheinlich ist. Nach [Fastenmeier et al. 2001] existieren folgende Ursachen für einen Spurwechsel:

<b>Langsames Vorderfahrzeug</b>	<b>Einfädelhilfe</b>	<b>Navigation</b>
<b>Präferenzspur</b>	<b>Unmotivierter Spurwechsel</b>	<b>Spur versperrt</b>

*Tabelle 4.1: Gründe für einen Spurwechsel nach Fastenmeier*

In der hier vorgestellten Funktion werden die beiden Hauptursachen für einen Spurwechsel, das langsamere Vorderfahrzeug (Kap. 4.3.3.1) und das kooperative Einfädelhilfeverhalten (Kap. 4.3.3.2), im Bereich von Auffahrten unterstützt. Auch Navigationsspurwechsel (Kap. 4.3.2) aufgrund aktiver Routenführung sind im Modell hinterlegt. Spurwechsel aufgrund einer Präferenzspur oder Spurwechsel aufgrund des Wegfalls einer Spur können mit der im Versuchsfahrzeug eingesetzten Seriensensorik nicht erfasst werden, könnten aber jederzeit über einen weiteren parallelen Ast innerhalb der Spurwechselmotivation abgebildet werden. Im eingesetzten Spurwechselmotivationsmodul wird auf Basis von gewichteten Einzelmotivatoren ein potentieller Spurwechsel vorausgesagt.

Anschließend wird eine komfortoptimierte Trajektorie des Ego-Fahrzeugs abhängig von der geometrischen Ausgangssituation und abhängig von den aktuellen Fahrdaten erzeugt. Alle für den Spurwechsel relevanten Objekte werden einer intensiven Kritikalitätsprüfung unterzogen. Diese Prüfung erfolgt sowohl für die Ausgangssituation als auch für zukünftige Zeitpunkte innerhalb der prädizierten Bahnkurve des Ego-Fahrzeugs. Eine räumliche sowie zeitliche Vermeidbarkeit eines Unfalls oder einer kritischen Situation kann somit garantiert werden. Besteht keine Behinderung oder Gefährdung der umgebenden Fahrzeuge, wird die Freigabe für einen Spurwechsel erteilt und der Annäherungsregler über ein Bypassingverfahren modifiziert.

In dieser Phase der aktuellen Erwartung eines Spurwechsels wird kontinuierlich geprüft, ob der Fahrer dieser impliziten Überholempfehlung auch nachkommt. Ist dies der Fall, kann ein Bremsen während der kompletten Annäherung vermieden werden. Laufen allerdings Prädiktion und das reale Verhalten des Fahrers auseinander, zeigt der Fahrer also keine Anzeichen für einen akuten Spurwechselbeginn, erfolgt an einem nach Sicherheitsmerkmalen parametrisierten Punkt eine Umschaltung auf den normalen Annäherungsregler. Basis für diesen Abgleich zwischen dem Erwartungswert und dem realen Verhalten ist hier das Modul Spurwechselbeginn-Erkennung. Sowohl das Modul Spurwechselmotivation als auch das Modul Spurwechselbeginn-Erkennung sind über das Modul Durchführbarkeit direkt mit dem Modul Bypassing verknüpft. Hier wird auf Basis der Annäherungssituation der erforderliche

Sollwert für den Annäherungsregler ermittelt und dem Serien-ACC mittels Bypassing zurückgespiegelt.

Alle Module der Funktion sind hierbei mit Matlab/Simulink und C im Rahmen dieser Arbeit programmiert worden. Für den Test der einzelnen Teilfunktionen wurden abhängig von den Phasen des Entwicklungsprozesses, Testmethoden wie Software in the Loop (SIL) oder Hardware in the Loop (HIL) sowie Realtests im Versuchsfahrzeug erfolgreich angewendet. Die Parametrierung der einzelnen Funktions- und Peripheriemodule stützt sich auf die Ergebnisse der Datenauswertung der Messdaten aus den Fahrversuchen. Daran schließt sich eine Applikation der einzelnen Parameter im Fahrzeug in enger Zusammenarbeit mit Spezialisten aus der ACC-Entwicklung an.

### 4.3.1 Peripheriemodule

Eine eindeutige Klassifizierung der Verkehrssituation ist für die Qualität und Korrektheit der Entscheidungsalgorithmen des situationsadaptiven ACC-Systems von hoher Bedeutung. Hierfür ist eine Auswahl der relevanten umgebenden Fahrzeuge erforderlich. Bild 4.3 zeigt die Fahrzeuge, welche bei einem Überholvorgang zu beachten sind.

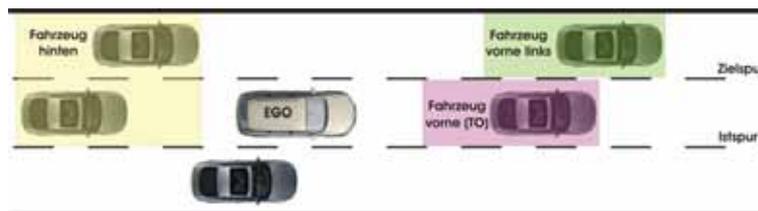


Bild 4.3: Relevante umgebende Fahrzeuge

Dabei handelt es sich um das zu überholende Fahrzeug (Target Object), ein Fahrzeug vorne links auf der Zielspur und Fahrzeuge, die sich hinter dem Ego-Fahrzeug in der gleichen Fahrspur oder eine Spur weiter links befinden. Bei einer aus den Navigationsdaten erkannten Einfädelsituation muss auch noch das einfädelnde Fahrzeug rechts vor dem Ego-Fahrzeug beachtet werden, ansonsten ist die Objektauswahl identisch.

Diese Fahrzeuge müssen aus der Gesamtheit aller Objekte aus den Rohdaten der Sensoren zur Überwachung des Raums vor und hinter dem Fahrzeug gewonnen werden. Für die Objektauswahl werden Algorithmen eingesetzt, die im Kontext von ACC als Auswahl mittels Fahrschlauch bezeichnet werden. Exemplarisch können gängige Ansätze zur Fahrschlauchgenerierung und zur Objektauswahl bei [Bosch 2002] nachgelesen werden. Der Fahrschlauch repräsentiert für das Ego-Fahrzeug die zukünftige Trajektorie. Zur Berechnung werden sowohl fahrzeugeigene Größen wie Lenkwinkel und Gierrate als auch geschätzte Krümmungsgrößen aus Standzielen, Navigationsdaten oder kollektiver Bewegung von Fremdfahrzeugen herangezogen (vgl. [Bosch 2002]). Auf Grundlage dieses Fahrschlauchs werden alle umgebenden Objekte bewertet und das jeweils relevante Zielobjekt gebildet. Für die Auswahl des Objekts vorne links ist der Auswahlprozess im Folgenden kurz beschrieben. Im ersten Schritt der Objektauswahl wird überprüft, welche Objekte sich im fahrsituationsspezifischen geometrischen Suchkorridor befinden. Die entsprechenden

Suchkorridore für die Objektauswahl sind in Bild 4.3 zu sehen. Anschließend werden aus dieser Untermenge alle stehenden und entgegenkommenden Fahrzeuge eliminiert<sup>4</sup>. Die verbleibenden Objekte werden nachfolgend aufsteigend nach ihrem longitudinalen Abstand geordnet. Das Objekt mit dem nächsten longitudinalen Abstand zum Ego-Fahrzeug auf der Zielspur ist das potentiell relevante Objekt. Allerdings nur, wenn dieses sich in einem geschwindigkeitsabhängigen räumlichen Korridor relativ zum direkten Zielobjekt auf der Startspur befindet (vgl. Bild 4.4). Ist beispielsweise ein Objekt auf der Zielspur vorhanden, das deutlich weiter entfernt ist als das direkte Zielobjekt, so wird es nicht in die Klassifikation der Verkehrssituation miteinbezogen.

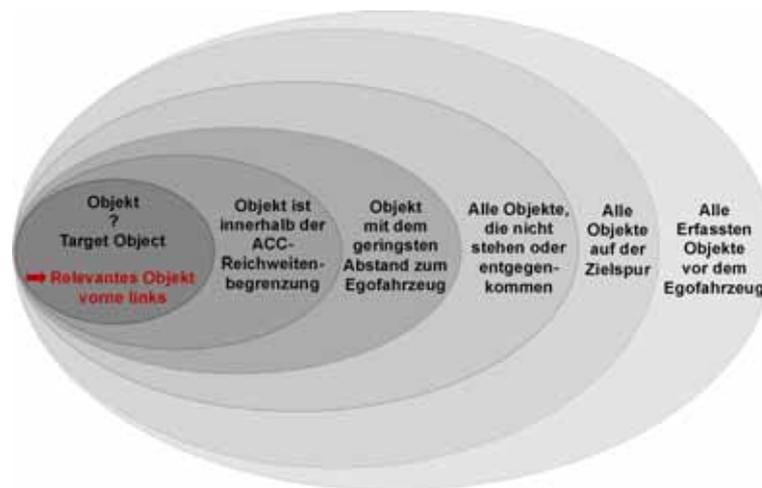


Bild 4.4: Zielobjektauswahl für Fahrzeuge auf der Zielspur

Für die Ermittlung des einfädelnden Fahrzeugs rechts vor dem Ego-Fahrzeug kann der Objektauswahlalgorithmus, mit invertiertem Vorzeichen für den lateralen Suchbereich, komplett übernommen werden.

Der Algorithmus für die Selektion des relevanten Objekts hinter dem Ego-Fahrzeug ist sehr ähnlich wie der bereits beschriebene, unterscheidet sich jedoch durch den Umstand, dass sowohl Fahrzeuge auf der Zielspur als auch auf der Istspur hinter und seitlich neben dem eigenen Fahrzeug berücksichtigt werden müssen. Anschließend werden alle Fahrzeuge, die mehr als 20 km/h langsamer als das Ego Fahrzeug sind, ausgeschlossen. Diese Schwelle wurde im Rahmen der Untersuchung der Beeinflussung des umgebenden Verkehrs im Projekt „Spurwechselsassistent“ ermittelt. Nach der geometrischen Auswertung erfolgt eine Auswahl nach der geringsten Zeitlücke, da dieses Fahrzeug physisch das am meisten beeinflussende Fahrzeug ist. Erfüllen sowohl ein Fahrzeug auf der Zielspur als auch ein Fahrzeug auf der Istspur alle Bedingungen gleichermaßen, wird das Objekt auf der Zielspur als stärker beeinflussend gewertet. Bild 4.5 verdeutlicht den Auswahlprozess für das relevante hintere Folgefahrzeug.

<sup>4</sup> Mit heutigen ACC-Sensoren ist eine Unterteilung stehender Objekte in Fahrzeuge und andere Objekte nicht zuverlässig möglich.

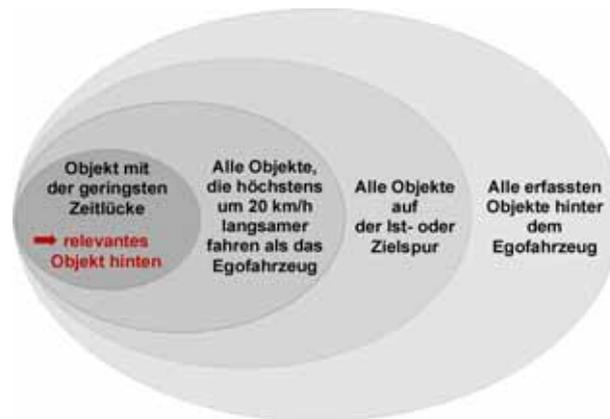


Bild 4.5: Zielobjektauswahl für Fahrzeuge hinten

Auf Basis dieser ermittelten Zielfahrzeuge ermittelt das Submodul Situationsklassifikation innerhalb der Peripheriemodule die aktuelle Verkehrssituation. Diese orientiert sich an der aus der Literatur bekannten Einteilung nach [Sparmann 1978], wird allerdings noch um die Dimension Einfädelsituation erweitert. Für die folgende detaillierte Situationsanalyse legt diese Verkehrssituationsauswahl fest, welche Objekte mitberücksichtigt werden müssen.

### 4.3.2 Abschaltkriterien

In den Abschaltkriterien (vgl. Bild 4.2) sind Bedingungen zusammengeführt, die eine reversible Abschaltung der Spurwechselunterstützungsfunktion zur Folge haben. Hierbei handelt es sich um einfache Wenn-dann-Bedingungen, entsprechend eines regelbasierten Entscheidungsprozesses, die alle gemeinsam positiv erfüllt sein müssen. Unterteilt wird dieses Modul in eine Selbstdiagnose- und in eine Situationsanalysefunktion. Erfolgt wegen einer oder beider Bedingungen eine reversible Abschaltung, steht weiterhin das Basis-ACC zur Verfügung. Im Selbstdiagnosemodul werden die Verfügbarkeit und die Systemzustände der vernetzten Fahrerassistenzsysteme geprüft. Nach Funktionsdefinition wird der Einsatzbereich auf Fahrgeschwindigkeiten zwischen 60 km/h und 200 km/h festgelegt. Innerhalb der Situationsanalyse werden verschiedene Merkmale zusammengefasst, die gegeben sein müssen, damit ein Szenario die Grundvoraussetzungen für eine situationsadaptive Annäherung in Spurwechselsituationen erfüllt:

- Das Fahrzeug befindet sich auf einer autobahnähnlichen Straße mit mehr als einer Richtungsfahrbahn.
- Neben dem Fahrzeug existiert eine weiter links liegende Fahrspur mit der gleichen Fahrtrichtung.
- Der Blinker nach rechts ist nicht eingeschaltet und das Fahrzeug befindet sich nicht in einem Spurwechsel nach rechts.
- Die Spurmarkierung links ist nicht durchgezogen als Hinweis auf ein Überholverbot.

Neben der Selbstdiagnose und der ersten grundlegenden Situationsanalyse wird in den Abschaltbedingungen noch ein Zielkonflikt aufgelöst, der durch das parallele Agieren der Funktion Spurwechselunterstützung und des Navigationssystems auftreten kann. Gemeint ist hierbei die Situation, bei der der Fahrer bei aktiver Routenführung über das Navigationssystem die Information erhält, die Autobahn an der nächsten Abfahrt zu verlassen. Hierbei erfolgt häufig ein frühzeitiges Einordnen in die rechte Fahrspur. Ist auf dieser Spur jedoch ein langsamer fahrendes Fahrzeug vorhanden, kann dies irrtümlicherweise zu einer Prädiktion eines Spurwechsels führen. Hierdurch erlebt der Fahrer einen deutlichen Diskomfort aufgrund der geänderten Annäherungsregelung. In dieser Situation stimmen also die Erwartung des Fahrers (komfortable Annäherung zum Abfahren) und die Situationsrepräsentation des Systems (vorhandener Überholwunsch) nicht überein (vgl. Bild 4.6).

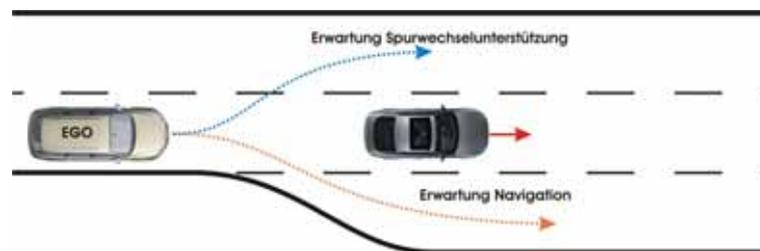


Bild 4.6: Zielkonflikt letzter Spurwechsel vor der Abfahrt

Aufgelöst wird dieser Konflikt in der Situationsanalyse dadurch, dass bei aktiver Routenführung und einem erforderlichen Verlassen der Autobahn eine Annäherung auf der rechten Spur näher als 500 m zur Ausfahrt nicht mehr durch die Funktion SWU unterstützt wird. Diese Schwelle wurde unter Berücksichtigung der Abfahrgewohnheiten der Fahrer aus den beiden Probandenstudien festgesetzt. Durch ortsfeste Aufforderungen des Versuchsleiters, die Autobahn zu verlassen, war eine Vergleichbarkeit zwischen allen Probanden gegeben. Eine weitere differenzierte Analyse könnte hier noch genauere Ergebnisse bieten, stand aber nicht im Fokus dieser Untersuchungen.

### 4.3.3 Spurwechselmotivation

Im Folgenden werden innerhalb der Motivation für einen Spurwechsel die Situation Einfädelhilfe und Überholen eines langsamen Vorderfahrzeugs unterschieden. [Fastenmeier et al. 2001] beschreiben in ihrem Modell verschiedene Ansätze, die zu einem Spurwechselwunsch führen können, und zeigen gleichzeitig auf, welche Situationen heute sensorisch erfasst werden können. Nach der Einteilung von [Toledo et al. 2003] gehören beide Spurwechselsituationen zur Klasse der freiwilligen (discretionary) Spurwechsel und grenzen sich somit deutlich von Spurwechseln aus Navigationsgründen oder wegen des Wegfalls von Fahrspuren ab.

### 4.3.3.1 Motivation aus Vorderfahrzeug

In diesem Teil der Funktion wird ein langsames Vorderfahrzeug vor dem Ego-Fahrzeug und dessen Einfluss auf den Spurwechselwunsch des Fahrers näher untersucht. Die untersuchte Verkehrsszene kann hierbei auf das in Bild 4.7 dargestellte Szenario reduziert werden.

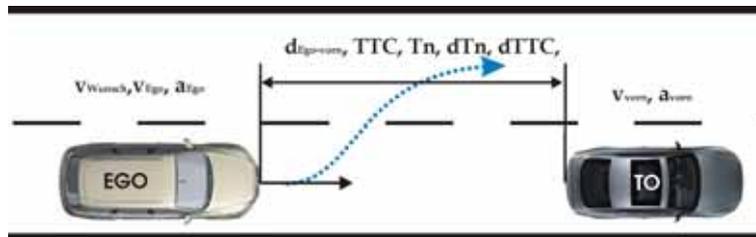


Bild 4.7: Verkehrssituation Spurwechselmotivation durch Vorderfahrzeug

Auf Basis der Klassifikation der Verkehrssituation wird bei einer Spurwechselsituation durch ein langsames Vorderfahrzeug vor der Auswertung der Einzelmotivatoren eine Betrachtung der Geschwindigkeitsverhältnisse durchgeführt. Hierbei handelt es sich um eine Vorprüfung zu den eigentlichen Motivationskriterien. Die Eingangsvariablen dieser Funktion sind die reale Ist-Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs ( $v_{Ego}$ ) auch kompensiert um das Voreilen des Tachos ( $v_{Tacho}$ ), die Geschwindigkeit des Target Objects ( $v_{TO}$ ), und die eingestellte ACC-Wunschgeschwindigkeit ( $v_{Wunsch}$ ). In der Funktion wird zum einen die Ist-Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs mit der Geschwindigkeit des Target Objects, zum anderen die Wunschgeschwindigkeit mit der Ist-Geschwindigkeit verglichen. Aus kombinatorischen Gründen sind neun verschiedene Fallsituationen, wie in Bild 4.8 dargestellt, möglich.

	$v_{Tacho} < v_{Wunsch}$	$v_{Tacho} = v_{Wunsch}$	$v_{Tacho} > v_{Wunsch}$
$v_{Ego} > v_{TO}$	Situation: Annäherung mit erhöhter Wunschgeschwindigkeit SW-Wunsch vorhanden	Situation: Annäherung aus Freifahrt SW-Wunsch vorhanden	Mit $v_{TO} > v_{Wunsch}$ (Bsp. Tip Down) kein SW-Wunsch vorhanden mit $v_{TO} < v_{Wunsch}$ (Bsp. Übertreten / Tip Up) SW-Wunsch vorhanden
$v_{Ego} = v_{TO}$	Situation: gleiche Geschwindigkeit wie TO aber Wunsch schneller zu fahren SW-Wunsch vorhanden	Situation: stabile Fahrfahrt kein SW-Wunsch vorhanden	Situation: stabile Fahrfahrt kein SW-Wunsch vorhanden
$v_{Ego} < v_{TO}$	Situation: Vorderfahrzeug entfernt sich kein SW-Wunsch vorhanden	Situation: Vorderfahrzeug entfernt sich kein SW-Wunsch vorhanden	Situation: Vorderfahrzeug entfernt sich mit Tip Down kein SW-Wunsch vorhanden

Bild 4.8: Prüfung der Geschwindigkeitsverhältnisse

Für die verschiedenen Fallgestaltungen wurde auf Basis von Expertenwissen definiert, ob bei den jeweiligen Geschwindigkeitsverhältnissen ein Überholwunsch des Fahrers zu erwarten oder sehr unwahrscheinlich ist. Falls eine Zuordnung der aktuellen Geschwindigkeitsverhältnisse zu einer Fallgestaltung erfolgt, die keinen Überholwunsch des Fahrers bestätigt, so werden die weiteren Algorithmen der Motivationskriterien nicht berechnet. Im Falle eines Überholwunsches werden die einzelnen Motivationskriterien, das eigentliche Kernstück des Motivationsmoduls, abgearbeitet.

#### 4.3.3.1.1 Wunschgeschwindigkeit

Nach [Kopf 1993] ist die Wunschgeschwindigkeit die Geschwindigkeit, die ein Fahrer unter Berücksichtigung der äußeren Umstände wie Straßenklasse, Wetter, Kurvigkeit bewusst wählt mit dem Ziel, diese möglichst einzuhalten. Darüber hinaus definiert Kopf die Wunschgeschwindigkeit als einen zeitlich nur langsam veränderbaren Parameter. Im ACC-Betrieb steht diese Geschwindigkeit unmittelbar in Form der ACC-Set-Speed zur Verfügung und wird als ein Motivator für einen Überholwunsch mitbetrachtet.

Die Analyse hat gezeigt, dass für die Spurwechselmotivation weniger der Absolutwert der Wunschgeschwindigkeit von Interesse ist, als vielmehr die Differenz zwischen der momentan angezeigten Fahrgeschwindigkeit ( $v_{Tacho}$ ) und der gesetzten Wunschgeschwindigkeit ( $v_{Wunsch}$ ). Diese Differenz gibt an, in wie weit der Fahrer seinen momentanen Geschwindigkeitswunsch umsetzen kann.

$$v_{Diff} = v_{Wunsch} - v_{Tacho} \quad (4.1)$$

Trifft das Ego-Fahrzeug auf ein vorausfahrendes, langsames Fahrzeug, würde dieses ohne einen Spurwechsel direkt zu einer Vergrößerung der Differenz aus Wunsch- und Ist-Geschwindigkeit führen. Die Entscheidung, ob in solch einer Situation überholt wird oder nicht, ist nach [Kopf 1993] und [Sparmann 1978] abhängig von der individuellen Toleranzschwelle für die Differenzgeschwindigkeit. Hierbei hat es sich als zielführend erwiesen, nicht nur die Differenz, sondern den auf die Wunschgeschwindigkeit normierten Quotienten zu betrachten.

$$W_{Rel} = (v_{Wunsch} - v_{Ist}) / v_{Wunsch} \quad (4.2)$$

Nach einer internen unveröffentlichten Studie der Audi AG zu dieser Toleranzschwelle hat sich ein Wert von 20% als geeignet herausgebildet. Aus dem Kennwert resultiert durch lineare Interpolation unmittelbar die untenstehende Kennlinie des Motivationskriteriums (vgl. Bild 4.9).

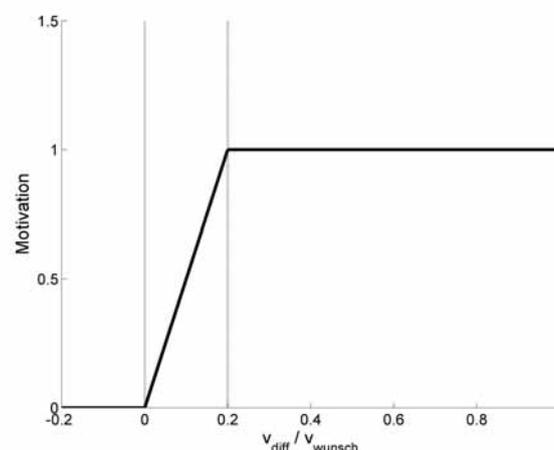


Bild 4.9: Kennlinie der Wunschgeschwindigkeit

Zu Grunde liegt hier die Annahme, dass es auch bei negativen Werten des Wunschgeschwindigkeitsquotienten keinen „negativen“ Überholwunsch gibt und dass dieser ansonsten linear von der normierten Wunschgeschwindigkeitsdifferenz abhängt.

#### 4.3.3.1.2 Differenzgeschwindigkeit

Die Differenzgeschwindigkeit zwischen dem Ego-Fahrzeug und dem Vorderfahrzeug ist der wichtigste Indikator, um einen Überholwunsch zu erkennen. [Wiedemann 1974] definiert in seiner Arbeit eine Wahrnehmungsschwelle, oberhalb derer Differenzgeschwindigkeiten erst wahrgenommen werden können. [Sparmann 1978] bestätigt dies durch seine Ergebnisse, dass die Differenzgeschwindigkeit fahrerspezifisch einen Spurwechsel indiziert oder nicht. Diese Aussage wurde von [Kopf 1993] in einer Studie zu Spurwechselforgängen belegt. Auch bei [Ehmanns 2002] und [Irmscher 2001] wurden Einflüsse der Differenzgeschwindigkeit auf das taktische Spurwechselverhalten untersucht.

$$v_{Diff} = v_{Ego} - v_{TO} \quad (4.3)$$

Aus der Analyse der Annäherungsvorgänge ohne ACC hat sich gezeigt, dass die Differenzgeschwindigkeit zum Vorderfahrzeug während des gesamten Spurwechsels auf der Autobahn nahezu konstant ist. Ein deutliches Beschleunigen in der Annäherungsphase erfolgt im Gegensatz zu Spurwechseln auf Langstraßen nur selten. In Bild 4.10 sind die Differenzgeschwindigkeiten zu den Zeitpunkten -6s, -4s, -2s vor Spurwechselbeginn und direkt zu Spurwechselbeginn dargestellt.

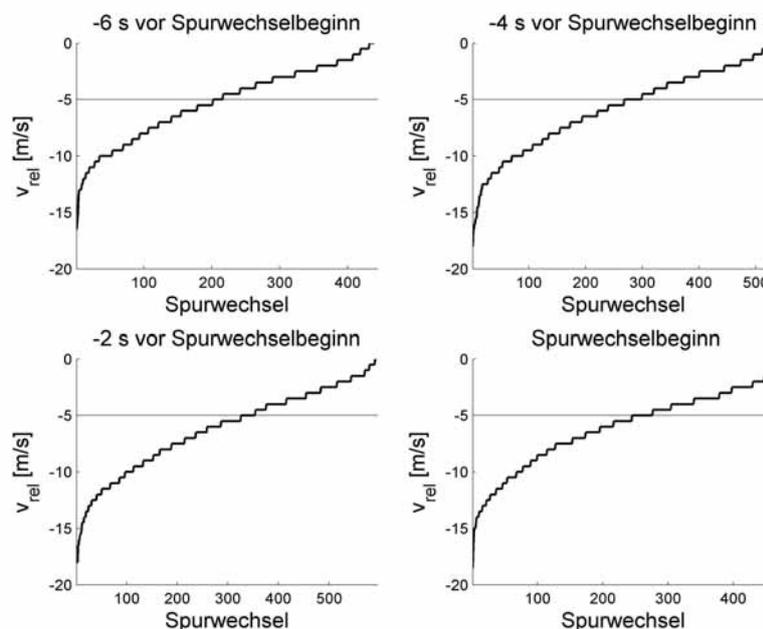


Bild 4.10: Differenzgeschwindigkeit zu festen Zeiten vor Spurwechselbeginn

Deutlich wird, dass sich die Differenzgeschwindigkeit im Verlauf eines Spurwechsels auf der Autobahn nur unwesentlich ändert. Daraus folgt unmittelbar, dass es ausreichend ist, die Differenzgeschwindigkeit nur für den Zeitpunkt des Ausscherens zu betrachten. Bild 4.11

zeigt die aufsteigend sortierte Verteilung der Differenzgeschwindigkeit bei Annäherungsspurwechseln aus den Fahrversuchen von 2005 und 2006.

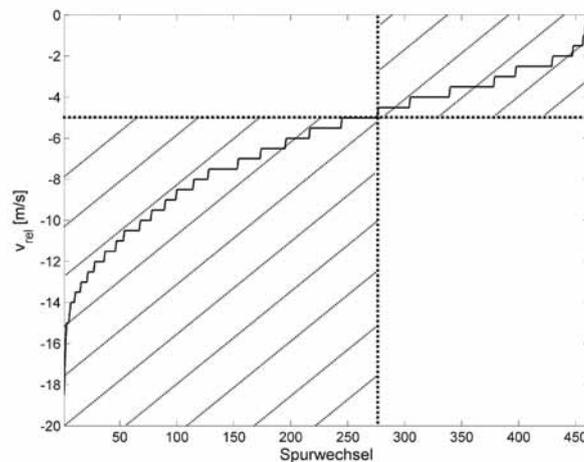


Bild 4.11: Differenzgeschwindigkeit zu Spurwechselbeginn

Es zeigt sich aus Bild 4.11, dass etwas mehr als die Hälfte aller Überholvorgänge eine Relativgeschwindigkeit kleiner als  $-5\text{m/s}$  aufweist. Diesem Wert steht die Forderung der Straßenverkehrs-Ordnung [StVO] entgegen, in der festgelegt ist:

*„Überholen darf ferner nur, wer mit wesentlich höherer Geschwindigkeit als der zu Überholende fährt.“*

Hauptsächlich adressiert diese Verordnung Überholvorgänge von Nutzfahrzeugen, da diese einen schnelleren Überholvorgang wegen der Begrenzung ihrer Maximalgeschwindigkeit nicht durchführen können. Bei PKW hängt die Entscheidung, mit welcher Differenzgeschwindigkeit ein Vorderfahrzeug noch überholt wird und bei welcher Differenzgeschwindigkeit sich eine Folgefahrt anschließt, vom Fahrertyp, vom Fahrerzustand und vom Fahrzeug ab. Grundsätzlich gilt, dass bei niedrigen Relativgeschwindigkeiten ein geringerer Überholwunsch zu erwarten ist. Unter Berücksichtigung der gewonnenen Erkenntnisse wurden die Stützpunkte der Kennlinie Differenzgeschwindigkeit mit  $2,7\text{ m/s}$  und  $7,0\text{ m/s}$  parametrisiert (siehe Bild 4.12).

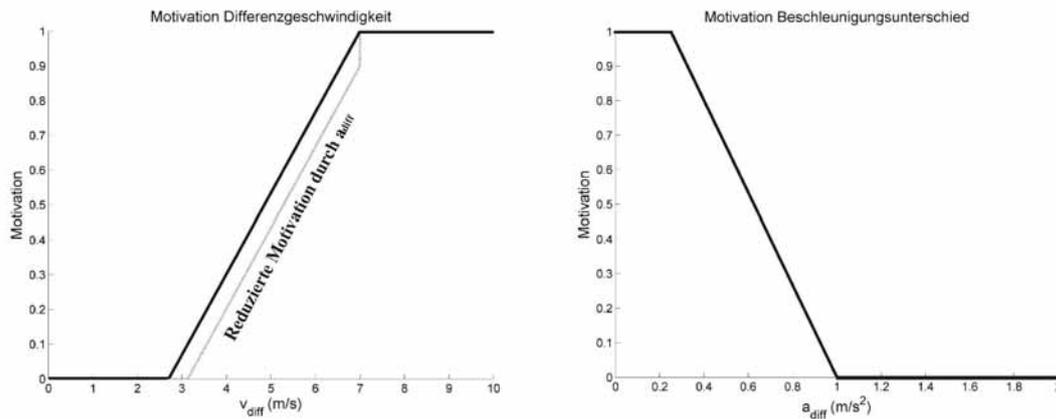


Bild 4.12: Kennlinien der Differenzgeschwindigkeit mit Beschleunigungseinfluss

Um den Einfluss starker negativer oder positiver Beschleunigungen mit abbilden zu können, wurde die Kennlinie im Übergangsbereich abhängig von der Differenzbeschleunigung ( $a_{diff}$ ) abgesenkt. Der Einflussfaktor der Differenzbeschleunigung wurde hierbei über eine linear abfallende Kennlinie aus Applikationsfahrten im Versuchsfahrzeug festgelegt.

$$a_{diff} = a_{TO} - a_{Ego} \quad (4.4)$$

In der Literatur wird die Wahrnehmung von Beschleunigungsdifferenzen zum Vorderfahrzeug kontrovers diskutiert. Nach [Hashimoto et al. 2000] und [Regan 1986] kann der Mensch solche Beschleunigungsdifferenzen nicht wahrnehmen. Nach [Bubb 1977] liegt die Reizschwelle für Beschleunigungsdifferenzen zwischen 0,01 bis 0,02 g.

Eindeutig ist jedoch, dass der Fahrer seinen eigenen Beschleunigungswunsch direkt am Gaspedal umsetzt und dass über diese Fahrerhandlung eine eindeutige Übersteuer-Absicht im ACC ausgedrückt wird. Daneben soll ein starkes Beschleunigen des Vorderfahrzeugs, beispielsweise nach dem Auffahren des Fahrzeugs auf die Autobahn, den Überholwunsch des Ego-Fahrzeugs reduzieren.

#### 4.3.3.1.3 Eintauchstärke und zeitlicher Abstand

Um eine Annäherungssituation aus dem ACC-Regelbetrieb zu erkennen, wurde das Eintauchen bei einem Spurwechsel näher untersucht. Als Hilfsgröße wird hier die Eintauchstärke eingeführt, die definiert ist als das Verhältnis der aktuellen Zeitlücke  $Tn_{Ist}$  zur eingestellten ACC-Zeitlücke  $Tn_{ACC}$ .

$$D_{Eintauch} = \frac{Tn_{Ist}}{Tn_{ACC}} \quad (4.5)$$

Es zeigt sich, dass die Zeitlücke beim Ausscheren bei einem Spurwechsel deutlich abweicht von dem in konstanter Fahrgeschwindigkeit eingehaltenen zeitlichen Abstand. Eine ausführliche statistische Analyse der Zeitlücke in Eintauchsituationen beim Spurwechsel ist in Kap. 4.3.4.2 im Kontext der Analyse der Kritikalität zu finden. Die Aussage von [Färber 1986], [Wiedemann 1974], [Leutzenbach & Willmann 1975], dass der Mensch den Abstand zum Vorderfahrzeug bei steigender Relativgeschwindigkeit zum Vorderfahrzeug sowie steigender

Fahrgeschwindigkeit überproportional erhöht, konnte hier für den Ausscherabstand bestätigt werden. Sichere Zeitlücken sind vom Gesetzgeber über die bekannte Faustformel „halber Tacho“ (1,8 s) definiert. Ab einer Unterschreitung von 0,9 s werden Bußgelder verhängt [KBA]. Dies deckt sich mit der Aussage von [Schnittger 1991], der in seinen Untersuchungen Zeitlücken kleiner als 0,8 s als verkehrstechnisch gefährdend definiert.

Die Zeitlücke als Messgröße liefert allerdings nur eine statische Aussage, in welchem Abstandsbereich im häufigsten Fall Spurwechsel zu erwarten sind. Eine Einteilung in Folgefahrt und Annäherung ist über dieses Kriterium direkt nicht zu treffen. Um diese Dynamikkomponente mit abzubilden, wurde die Eintauchstärke mit der zeitlichen Änderung der Zeitlücke kombiniert. Die Abnahme der Zeitlücke ( $T_n$ ) ist ein eindeutiges Zeichen, dass eine dynamische Annäherung an ein Vorderfahrzeug stattfindet. Die nahe liegende Berechnung kann durch die Bildung des Differenzenquotienten erfolgen:

$$dT_n(t) = \frac{T_{n(i)} - T_{n(i-1)}}{\Delta t} \quad \Delta t \rightarrow 0 \quad (4.6)$$

Diese mathematische Berechnungsmethode zeigt allerdings im praktischen Einsatz, aufgrund der mangelhaften Auflösung und Sprunghaftigkeit des Signals Abstand im Versuchsfahrzeug, deutliche Schwächen. Um ansonsten erforderliche Filterungen und Mittelungen des Signals vermeiden zu können, kann die Ableitung der Zeitlücke wie folgt mathematisch umgeformt werden:

$$dT_n(t) = \frac{\Delta T_n}{\Delta t} = \frac{\Delta dx}{\Delta t \cdot v_{Ego}(t)} = \frac{\Delta t \cdot v_{Rel}(t)}{\Delta t \cdot v_{Ego}(t)} = \frac{v_{Rel}(t)}{v_{Ego}(t)} \quad (4.7)$$

Mit dieser Umformung ist die Änderung der Zeitlücke als Verhältnis der Relativ- und der Fahrgeschwindigkeit interpretierbar (vgl. Bild 4.13)

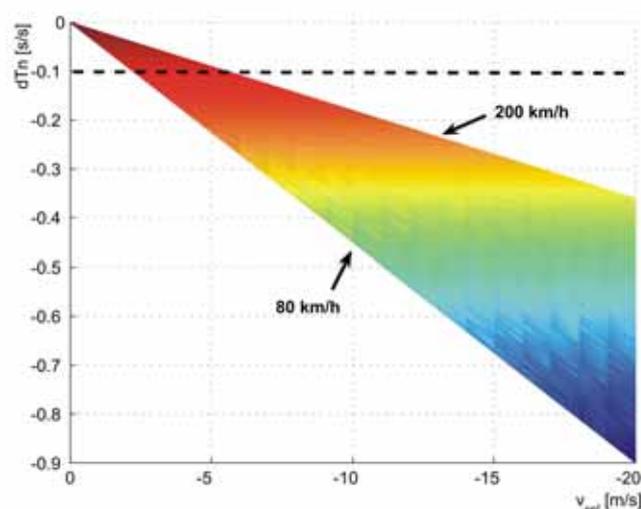


Bild 4.13: Ableitung der Zeitlücke ( $dT_n$ ) (Dynamikgrenze)

Bei der Definition der Schwellwerte für die Dynamikgrenze wurde auf die im letzten Kapitel beschriebenen Erfahrungen zur Wahrnehmung und Toleranz von Differenzgeschwindigkeiten

zurückgegriffen. Zum Beispiel ist bei 200 km/h eine Geschwindigkeitsdifferenz von ungefähr 6 m/s erforderlich, wohingegen bei 80 km/h nur 2,5 m/s notwendig sind, um das Kriterium der Dynamikgrenze ( $dT_n=0,1$ ) voll zu erfüllen. Der Übergang von der Dynamikgrenze zu  $dT_n = 0$  wurde quadratisch gewählt, um dem Umstand der nichtlinearen menschlichen Wahrnehmung Rechnung zu tragen (vgl. Bild 4.14). Wie oben beschrieben, basiert die Parametrierung der Eintauchstärke auf den Erkenntnissen aus Kapitel 4.3.4.2, in dem im Kontext der Kritikalitätsbewertung von Verkehrssituationen, die Zeitlücke zum Vorderfahrzeug zu Beginn des Ausscherens ausgewertet wurde. Diese ermittelten Grenzwerte wurden dann in Beziehung gesetzt zur ACC-Sollzeitlücke, woraus direkt die Parametrierung des Motivators Eintauchstärke folgt (vgl. Bild 4.14).

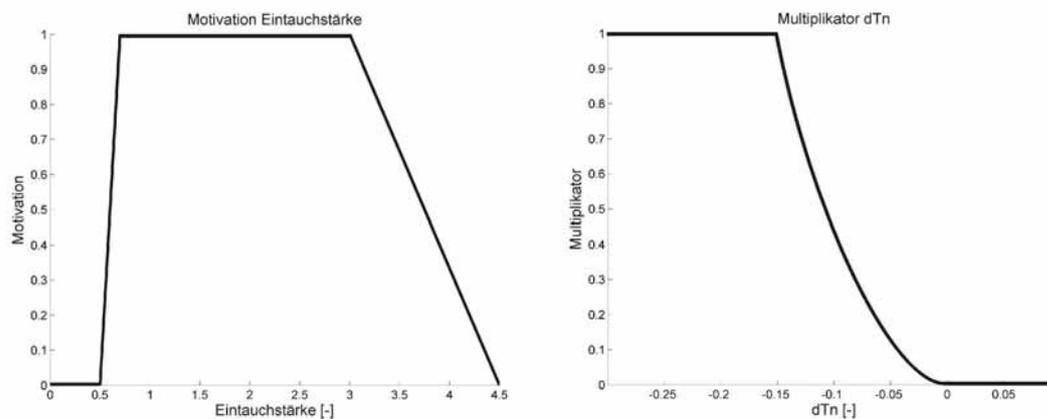


Bild 4.14: Kennlinien der Eintauchstärke

Betrachtet man das Produkt aus der Eintauchstärke und der Dynamikgrenze, so liefert dieses einen wertvollen Beitrag zur Voraussage eines bevorstehenden Spurwechsels.

#### 4.3.3.1.4 Ableitung der Time to Collision

Die Ableitung der Time-to-Collision [dTTC] wird u.a. bei [Rekersbrink 1994] zur Spurwechselbeginn-Erkennung eingesetzt und wird auch in diesem Modell zur Spurwechselabsichtserkennung analysiert. Sie basiert auf der zeitlichen Ableitung der Time-to-Collision (TTC). Diese wiederum gibt die „potentielle“ Kollisionszeit an, bei der ein Unfall bei unveränderten Geschwindigkeiten zweier einander folgender Fahrzeuge eintreten wird. Bei schnellerem Führungsfahrzeug ist sie somit unendlich groß, bei langsamerem Führungsfahrzeug ergibt sich folgender Zeitwert:

$$TTC = -\frac{\Delta x}{\Delta v} \quad (4.8)$$

Solange bei einem Annäherungsprozess ( $TTC > 0$ ) die erste Ableitung der Kollisionszeit nicht unter den Wert -0,5 fällt, ist nach [Rekersbrink 1994] eine Annäherung unkritisch, da zeitnah keine Kollision droht. In solchen Situationen ist ein Spurwechsel unwahrscheinlich und es kann eine Folgefahrt erwartet werden. Bei der Berechnung der Ableitung wurde analog der Dynamikgrenze ein Differenzenquotient verwendet mit anschließender gleitender Mittelwertberechnung, wie in Formel (4.9) beschrieben.

$$dTTC(t) = \frac{TTC_{(t_1)} - TTC_{(t_0)}}{\Delta t} \quad (4.9)$$

In der Analyse der aufbereiteten dTTC-Ergebnisse zeigt sich, dass der dTTC-Wert bei Annäherungen unabhängig von den eingehenden Zustandsgrößen immer ungefähr bei -1 liegt. Dieses Ergebnis überrascht unter der Näherung nicht, dass sich die Relativgeschwindigkeit zwischen zwei Zeitschritten nur vernachlässigbar ändert, wenn die Zeitschritte sehr klein sind (vgl. Formel (4.10)).

$$dTTC = \frac{\Delta TTC}{\Delta t} = \frac{\frac{dx(t_1)}{-v_{Rel}(t_1)} - \frac{dx(t_0)}{-v_{Rel}(t_0)}}{\Delta t} \approx \frac{\frac{\Delta dx}{-v_{rel}(t_1)}}{\Delta t} = -\frac{\Delta t \cdot v_{Rel}}{\Delta t \cdot v_{Rel}} = -1 \quad (4.10)$$

Logisch steht hinter dieser mathematischen Umformung die Erkenntnis, dass die TTC die Zeitdauer angibt, wann zwei Fahrzeuge, bei gleich bleibender Situation, kollidieren würden. Bleibt die Verkehrssituation, insbesondere die Relativgeschwindigkeit, gleich, nimmt die TTC innerhalb von einer Sekunde genau um den Wert -1 s ab. Aufgrund der relativ geringen Auflösung der Sensorsignale Abstand und Relativgeschwindigkeit und der langsamen Wiederholrate der Sensoren können Änderungen der TTC somit nur sprunghaft detektiert werden und eine kontinuierliche Abbildung der Änderung der Kritikalität der Verkehrssituation ist somit nicht möglich. Unter Berücksichtigung dieser Erkenntnisse wurde der Indikator dTTC für die Spurwechselunterstützungsfunktion nicht verwendet.

#### 4.3.3.1.5 Annäherungskritikalitätsmaß

Bei der Analyse von möglichen Indikatoren für einen Spurwechsel wurde ein weiteres Maß zur Bewertung der Kritikalität untersucht. Basierend auf der mit ACC ausregelbaren maximalen Differenzgeschwindigkeit aus [Bosch 2002] wurde die folgende Kennzahl analysiert:

$$A_{Krit} = \frac{(v_{diff})^2}{(\Delta x)^2} \quad (4.11)$$

Dieses Annäherungskritikalitätsmaß ( $A_{Krit}$ ) beschreibt die Dynamik eines Annäherungsvorganges in Abhängigkeit von der Differenzgeschwindigkeit zwischen dem Ego-Fahrzeug und dem Vorderfahrzeug, in Abhängigkeit von dem Abstand zwischen diesen beiden Fahrzeugen. Bild 4.15 zeigt die Verteilung des Annäherungskritikalitätsmaßes zum Zeitpunkt des Ausscherens aus beiden Fahrversuchen ohne ACC.

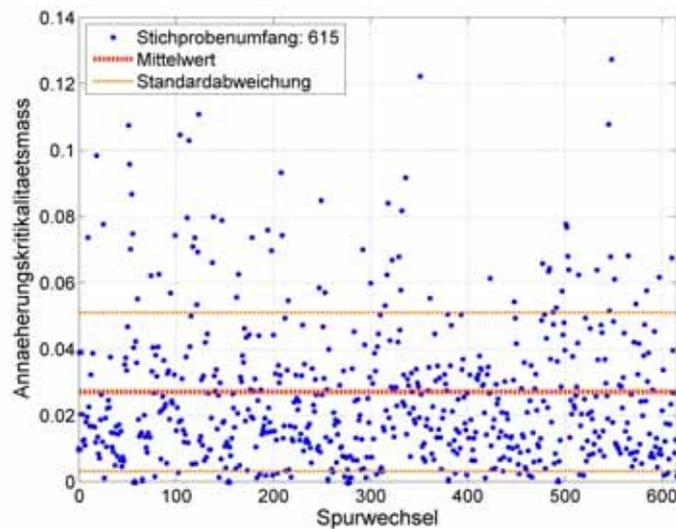


Bild 4.15: Annäherungskritikalitätsmaß während des Spurwechsels

Aus der diffusen Verteilung zeigt sich, dass dieser Indikator nur unzureichend geeignet ist einen Spurwechsel zu prognostizieren. Wegen der geringen Aussagekraft wird dieses Merkmal nicht zur Prädiktion eines Spurwechselwunsches eingesetzt.

#### 4.3.3.2 Motivation aus Einfädelsituation

Neben der Motivation für einen Spurwechsel aufgrund eines langsamen Vorderfahrzeugs wird auch der Spurwechselwunsch aufgrund kooperativen Verhaltens im Bereich von Autobahnauffahrten untersucht. Bild 4.16 zeigt hierbei stilisiert das untersuchte Verkehrsszenario.

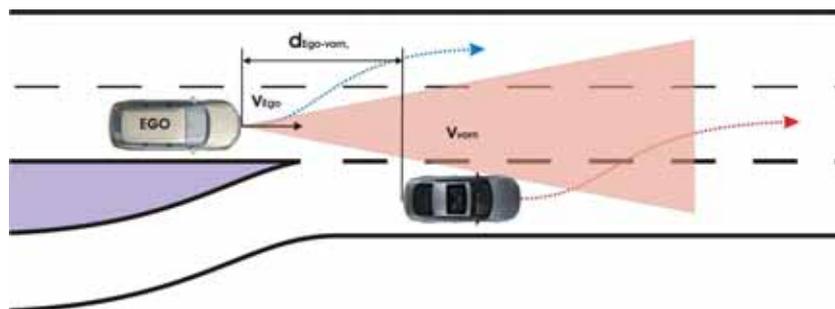


Bild 4.16: Verkehrsszene Einfädelhilfe

Eine Erkennung der Einfädelsituation wird über die Vernetzung von prädiktiven Streckendaten und dem LKA-System möglich. Hierdurch stehen der Situationserkennung aus dem Navigationssystem alle Auffahrten entlang der Fahrtroute zur Verfügung. Die Spurerkennung aus dem LKA-System ermöglicht eine exakte Detektion des Beginns des Beschleunigungsstreifens. Liegt diese Verkehrssituation vor, wird entsprechend der Objektauswahl das potentiell beeinflussende Fahrzeug extrahiert. Generell handelt es sich bei diesem Szenario um eine relativ seltene Verkehrssituation. Um die Zahl der auswertbaren Situationen zu erhöhen wurde bei jedem Probanden eine Auffahrtsituation durch ein

Stuntfahrzeug ohne Wissen des Probanden gestellt. Insgesamt entstanden so 77 Situationen aus den Probandendaten von 2006 und 2005, von denen allerdings nur 29 Situationen vollständig alle Daten enthielten. In den anderen 56 Situationen wurde das Fahrzeug auf der Einfädelspur gar nicht oder nur fehlerhaft vom Radarsensor erfasst. Insbesondere der geringe Öffnungswinkel des Sensors und die Verdeckung durch direkt vorausfahrende Fahrzeuge oder Bebauung am Fahrbahnrand reduzierten die Zahl der auswertbaren Situationen erheblich. Zur Analyse eines Spurwechselwunsches wurden die Relativgeschwindigkeit und der Abstand zu dem einfädelnden Fahrzeug aufsteigend sortiert und analysiert (vgl. Bild 4.17 und Bild 4.18).

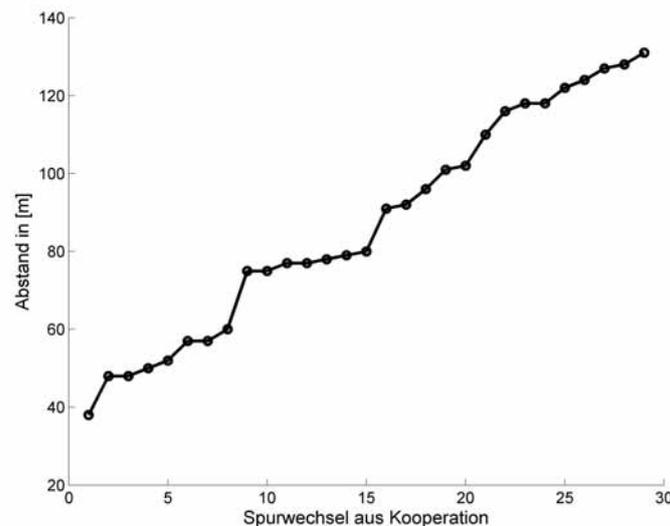


Bild 4.17: Abstand zum Einfädelfahrzeug bei Spurwechselbeginn

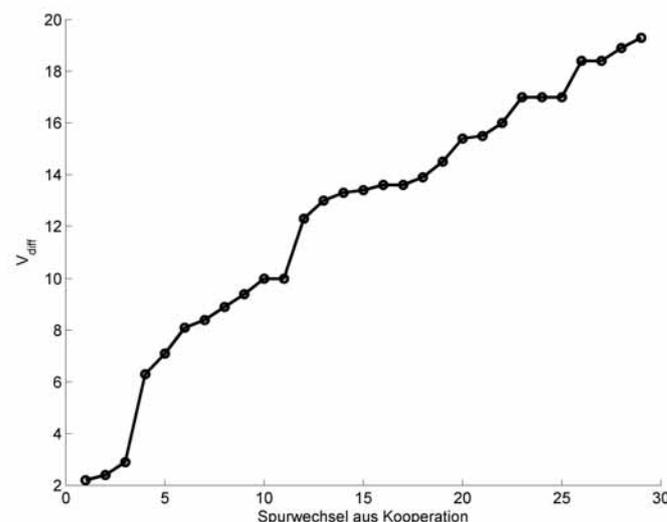


Bild 4.18: Differenzgeschwindigkeit zum Einfädelfahrzeug bei Spurwechselbeginn

Die Daten wurden hierbei zu dem Zeitpunkt betrachtet, an dem das einfädelnde Fahrzeug erstmalig vom Radarsensor detektiert worden ist. Bei der Auswertung der Daten sind weder beim Abstand, noch bei Geschwindigkeitsdifferenz eindeutige Häufigkeiten erkennbar. Die

erwartete Modellvorstellung, dass sich der Spurwechselwunsch nur bei speziellen Linearkombinationen der unabhängigen Merkmale einstellt, konnte nicht bestätigt werden. Eine Korrelation von Abstand und Relativgeschwindigkeit konnte nicht festgestellt werden. Für die Parametrierung des Motivators Differenzgeschwindigkeit wurde eine zweiwertige Einteilung in schnell ( $> 6 \text{ m/s}$ ) und langsam ( $< 4 \text{ m/s}$ ) durch Fuzzy-Mengen in Trapezform vorgenommen. Die Grundlagen der Fuzzy-Logik sind im Anhang B zusammengestellt. Das entsprechende Regelwerk ist hierbei trivial und lautet:

IF  $v_{\text{diff}}$  = klein THEN SW-Prädiktion = NEIN

IF  $v_{\text{diff}}$  = groß THEN SW-Prädiktion = JA

Neben der Relativgeschwindigkeit beeinflusst die noch verbleibende Länge der Einfädelspur das Kooperationsverhalten des Fahrers. Denn befindet sich das einfädelnde Fahrzeug schon kurz vor Ende der Beschleunigungsspur erhöht sich dessen Dringlichkeit für einen Spurwechsel (vgl. [Kita 1993]). Bei [Toledo et al. 2003] und [Ahmed 1999] wird eine solche Spurwechselsituation aus Sicht des Einfädlers als „mandatory“ bezeichnet und zieht ein ausgeprägtes kooperatives Verhalten des passierenden Fahrzeugs auf der Autobahn nach sich. Mit den heutigen FAS steht weder diese Information zur Verfügung, noch kann ein Richtwert für die Länge der Einfädelspur angenommen werden. Nach [StVO] gilt im Straßenbauwesen lediglich:

*"Die Länge der Beschleunigungsspur muss so groß sein, dass Fahrzeuge aus dem Stand auf Autobahngeschwindigkeit beschleunigen können. Zu berücksichtigen sind dabei die Fahreigenschaften des Schwerlastverkehrs und von Kleinwagen sowie die Steigung der Auffahrt."*

Bild 4.19 zeigt schematisch die Bauvorschrift für eine Auffahrt auf Autobahnen.

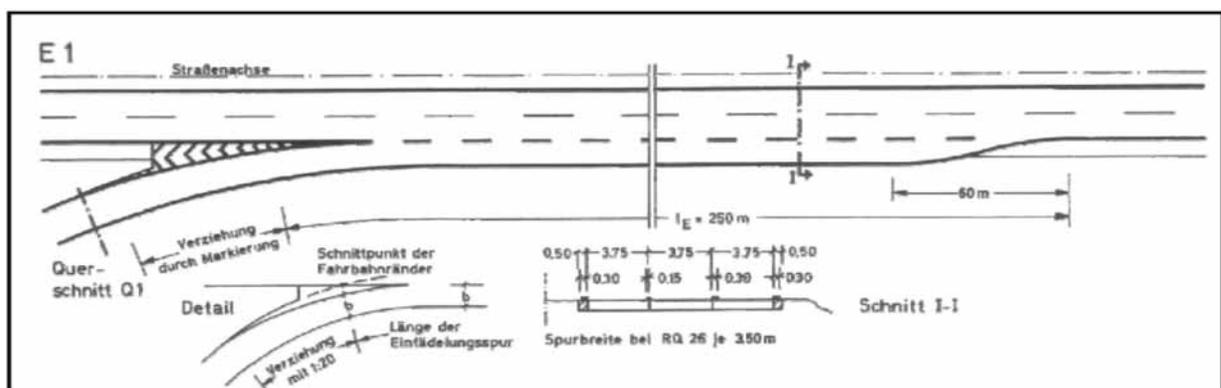


Bild 4.19: Autobahnauffahrt nach StVO

Zusammenfassend ist zu sagen, dass die Analyse der Einfädelsituation nur eine qualitative Aussage, dass ein Spurwechsel erfolgen wird, zulässt. Erst eine verbesserte Sensorik im Nahbereich wird hier eine zuverlässige Vorrausage einer Spurwechselabsicht aus Kooperation möglich machen.

#### **4.3.4 Sichere Durchführbarkeit des Spurwechsels**

Die sichere und komfortable Durchführbarkeit eines bevorstehenden Spurwechsels ist entscheidend dafür, ob ein vorhandener Spurwechselwunsch auch in die Tat umgesetzt wird. Maßgeblich sind zum einen die Sicherheit und der Komfort der abzufahrenden Bahnkurve im Verlauf des Spurwechsels. Zum anderen dürfen keine umgebenden Fahrzeuge im zeitlichen Verlauf eines Spurwechsels behindert oder gefährdet werden. Dieser zweistufige Entscheidungsprozess wird auch in der Spurwechselunterstützungsfunktion des situationsadaptiven ACC abgebildet. Deshalb ist dieses Funktionsmodul unterteilt in die Trajektoriengenerierung für das Ego-Fahrzeug und die Bewertung der Kritikalität zu allen relevanten umgebenden Fahrzeugen.

In der Trajektoriengenerierung erfolgt eine Prädiktion der eigenen Bahnkurve des potentiell bevorstehenden Spurwechsels. Hierbei werden sowohl der frühest- und letztmögliche Spurwechselbeginn, also die taktische Komponente der Spurwechselentscheidung, als auch die Spurwechseldauer und die erwartete Bahnkurve in longitudinaler und lateraler Richtung berechnet. Ein Spurwechsel wird hierbei als durchführbar klassifiziert, wenn er allen Optimierungskriterien hinsichtlich Sicherheit und Komfort genügt.

Bezogen auf diese Trajektorie des Ego-Fahrzeugs erfolgt eine Prädiktion des Verhaltens aller umgebenden Verkehrsteilnehmer, entsprechend der vorliegenden Verkehrssituation. Daran schließt sich eine Analyse der Kritikalität dieser Fahrzeuge, bezogen auf das Ego-Fahrzeug, anhand TTC- und Tn-Betrachtungen an. Abhängigkeiten der Kritikalität umgebender Fahrzeuge bezüglich der Fahrgeschwindigkeit und der Relativgeschwindigkeit zum Ego-Fahrzeug werden hierbei genauso berücksichtigt, wie die nichtlineare Gefahrenwahrnehmung durch den Fahrer. Existiert subjektiv und objektiv keine Gefährdung während des gesamten prädierten Verlaufs des Spurwechsels, erfolgt eine Freigabe der SWU-Funktion.

In den folgenden Kapiteln wird die Trajektoriengenerierung und die Analyse der Kritikalität detailliert erläutert.

##### **4.3.4.1 Modellierung der Spurwechseltrajektorie**

Gängige Ansätze zur Beschreibung der Bahnkurve von Spurwechseln sind aus der Unfallrekonstruktion von Spurwechselunfällen bekannt. Sie werden im Folgenden kurz vorgestellt und hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit bewertet. Eine Nutzung dieser Beschreibungsmodelle zum Zweck einer Prädiktion ist teilweise aufgrund funktionaler Grenzen nur eingeschränkt möglich. Häufig angewendet werden das Kreisbogenverfahren, die doppelte Scheitelklothoide, die schräge Sinuslinie, Polynomansätze sowie Mischformen dieser Verfahren.

### **Kreisbogenverfahren:**

Nach dem Kreisbogenverfahren von [Runkel 1969] wird die Schwerpunktbahn des Fahrzeugs während eines Spurwechsels über zwei gegensätzlich gekrümmte Kreisbogen beschrieben. Dieses Verfahren ist eine geometrisch einfache Beschreibungsform, allerdings folgt aus der Geometrie der Kreise ein unrealistischer Quergeschwindigkeits- und Querbeschleunigungsverlauf, da hier kein stetiger Übergang zwischen Geradeausfahrt und Spurwechselbeginn besteht. Somit wäre in dieser Situation ein Lenkwinkelsprung erforderlich, der einen unrealistischen Querbeschleunigungsverlauf zur Folge hat (vgl. [Weiss 1988]). Für eine möglichst realitätsnahe Online-Prädiktion ist dieses Verfahren deshalb nur eingeschränkt nutzbar.

### **Doppelte Scheitelklothoide:**

Die doppelte Scheitelklothoide ist ein Verfahren, das im Straßenbauwesen zur Trassierung von Kurven eingesetzt wird. Zur Beschreibung von Spurwechseln wurde diese Beschreibungsform bei [Spindler 1962] vorgestellt. Sie erfüllt hierbei nach [Sporrer et al. 1998] die Forderung nach einem natürlichen, nicht sprunghaften Querbeschleunigungsverlauf. Die Herausforderung dieser exakten Beschreibungsform sind die hohen Anforderungen an die mathematische Beschreibung von Klothoiden. Im Forschungsstadium befinden sich neue Ansätze zur Approximierung von Klothoiden über Bezier Kurven. Erste mathematische Modelle, die auch Online im Fahrzeug zur Trajektorienprädiktion eingesetzt werden können, sind z.B. bei [Montes et al. 2007] zu finden.

### **Schräge Sinuslinie:**

Die schräge Sinuslinie geht auch auf [Spindler 1962] zurück, der in seiner experimentellen Arbeit analytische Beschreibungsmöglichkeiten des Spurwechsels ermittelt hat. Diese stützen sich auf die Analyse von Fahrversuchen mittels Fotoauswertungen von Schwerpunktbahnverläufen. Die Querbeschleunigung kann hierbei direkt durch zweimaliges Differenzieren der lateralen Position gewonnen werden. Ein geeignetes Näherungsverfahren zur vereinfachten Abschätzung der Querbeschleunigung wird bei [Spindler 1962] vorgestellt. Um die Aussagekraft und die Qualität der Ergebnisse bei der Beschreibung von Spurwechseltrajektorien noch zu verbessern, schlagen [Burg & Rau 1981] das arithmetische Mittel aus schräger Sinuslinie und dem Kreisbogenverfahren vor. Generell bietet die schräge Sinuslinie eine hinreichende Genauigkeit bei angemessenem Rechenaufwand zur mathematischen Beschreibung.

### **Polynomansätze:**

Neben der analytischen Beschreibung von Spurwechseltrajektorien werden auch Polynomansätze verwendet, wie beispielsweise bei [Nelson 1989]. Hierbei wird die Trajektorie durch zwei über die Zeit gekoppelte Polynome in lateraler und longitudinaler Richtung beschrieben. Die Querbeschleunigung folgt unmittelbar durch Differenzierung. Der Vorteil dieses Ansatzes

ist seine mathematische Einfachheit und die garantierte Stetigkeit der Querschleunigung. Nachteilig ist die geringe Aussagekraft des Polynoms zum Zweck der direkten Interpretation.

### **Eigener Ansatz:**

Für die Situationsanalyse der Funktion SWU soll eine Beschreibungsform der Trajektorie gefunden werden, die einerseits hinreichend genau die realen Fahrten der Probanden abbildet, andererseits mathematisch so beschreibbar ist, dass die Trajektorie einfach interpretierbar ist und zum Zweck einer Prädiktion eingesetzt werden kann. Die beiden maßgeblichen Faktoren bei der Generierung einer Spurwechseltrajektorie sind die geometrischen Gegebenheiten in Form der Ausweichbreite und das Komfortempfinden des Fahrers, beschrieben über die akzeptierte Querschleunigung. Nach der hier gewählten Definition gilt der Spurwechsel in der Mitte der Zielspur als beendet. Aus Formel (4.12) ergibt sich somit als zurückzulegender Weg in lateraler Richtung die Größe ( $y_{gesamt}$ ) aus der aktuellen Querablage ( $y_{Ablage}$ ) sowie den jeweils halben Spurbreiten von Start- und Zielspur ( $d_{Startspur}$ ,  $d_{Zielspur}$ ). Die Querablage ist hierbei definiert als der Versatz der Fahrzeugmittelachse zur Spurmitte, beschrieben im Konstruktionskoordinatensystem des Fahrzeugs.

$$y_{gesamt} = -y_{Ablage} + \frac{d_{Startspur}}{2} + \frac{d_{Zielspur}}{2} \quad (4.12)$$

Der entscheidende Optimierungsfaktor hinsichtlich Komfort und Sicherheit eines Spurwechsels ist die auftretende Querschleunigung. Hierzu sind sehr unterschiedliche Ergebnisse, welche Querschleunigungen von Fahrern während des Spurwechsels akzeptiert werden, in der Literatur zu finden. Nach [Schimmelpfennig & Nackenhorst 1985] liegt die vom Fahrer akzeptierte Grenze der Querschleunigung bei allen Fahrmanövern abhängig von der Fahrgeschwindigkeit maximal bei 4 m/s<sup>2</sup>. Explizit auf Spurwechselsituationen übertragen wurden bei normalen Spurwechseln Werte von 0,7 bis 0,9 m/s<sup>2</sup> erreicht. Bei dynamischen Spurwechseln lag die Grenze bei maximal 2,1 m/s<sup>2</sup>. Eine Abhängigkeit der akzeptierten Querschleunigung von der Fahrgeschwindigkeit wurde bei [Schimmelpfennig & Nackenhorst 1985] und [Niehoff 2005] festgestellt. [Weiss 1988] definiert einen Querschleunigungsbereich bei Fahrgeschwindigkeiten zwischen 25 und 150 km/h von bis zu 6 m/s<sup>2</sup> in normalen, nicht kritischen Fahrsituationen. In dieser Auswertungen wurde keine Abhängigkeit dieses Grenzwertes von der Fahrgeschwindigkeit oder eine Differenzierung nach Fahrsituationen durchgeführt. Neue Erkenntnisse von [Sporrer et al. 1998] widersprechen einer Abhängigkeit der Querschleunigung von der Fahrgeschwindigkeit. Hier werden die durchgeführten Probandenversuche unterteilt in normale und schnelle Spurwechsel. Bei normalen Spurwechseln wurden Querschleunigungen von 1,3 m/s<sup>2</sup> festgestellt, schnelle Spurwechsel lagen im Bereich von 3 m/s<sup>2</sup>. Zusätzlich dazu wurde von [Sporrer et al. 1998] eine Asymmetrie im Querschleunigungsverlauf festgestellt. So wurden die maximalen Querschleunigungen immer beim Auslenken aus der Starspur festgestellt und lagen quantitativ deutlich über dem Querschleunigungsbedarf beim Einlenken in die Zielspur. Des Weiteren stellen [Sporrer et al. 1998] in ihren Untersuchungen fest, dass für die Querschleunigung während des Spurwechsels die vorgefundene Verkehrssituation auf der Zielspur maßgeblich ist. Ist diese durch viele umgebende Fahrzeuge belegt, existieren also nur

kleine Lücken, akzeptiert der Fahrer höhere Querbeschleunigungen während des Spurwechsels.

Um den Einflussfaktor Querbeschleunigung zur Trajektoriengenerierung verwenden zu können, wurden 615 Spurwechsel aus den beiden Fahrstudien 2005 und 2006 untersucht. Bild 4.20 zeigt den Querbeschleunigungsverlauf aller Spurwechsel im Zeitfenster  $\pm 5$  s relativ zum Zeitpunkt Line Crossing<sup>5</sup>.

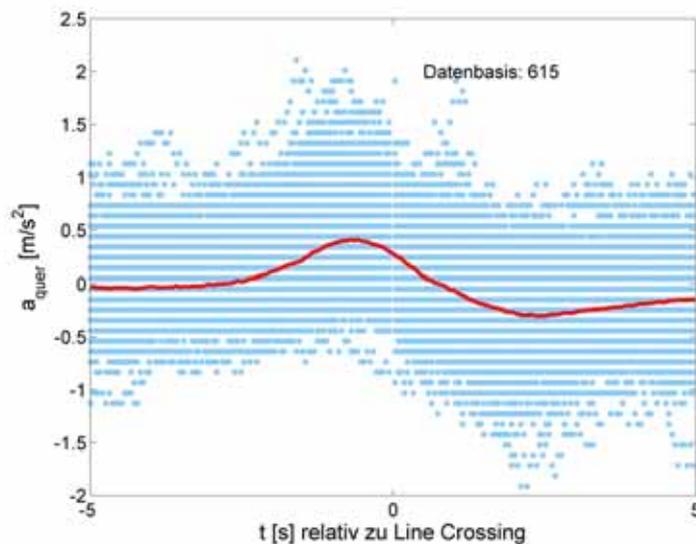


Bild 4.20: Querbeschleunigung während des Spurwechsels

In Bild 4.20 ist ein in etwa sinusförmiger Verlauf zu erkennen, der leicht asymmetrisch in Amplitude und Phase ausfällt. Der von [Sporrer et al. 1998] gefundene Effekt, dass bei der Einleitung eines Spurwechsels höhere Querbeschleunigungen auftreten als beim Einlenken in die Zielspur, konnte bestätigt werden. Die ermittelte Querbeschleunigung liegt in der Phase des Auslenkens zirka doppelt so hoch wie beim Wiedereinlenken. Hieraus folgt unmittelbar, dass die Phase des Auslenkens auch zeitlich kürzer ist als die des Zurücklenkens in die Zielspur. Für die Ermittlung der maximal aufgetretenen Querbeschleunigung ist diese Zusammenfassung der Messdaten allerdings ungeeignet, da das Maximum bei den Spurwechseln zeitlich nicht in konstantem Abstand zum Zeitpunkt Line Crossing liegt. Deshalb wird eine weitere Analyse relativ zur Lage des Maximums durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Bild 4.21 dargestellt. Das heißt, das Zeitfenster 5s vor bis 5s nach orientiert sich diesmal an dem Zeitpunkt der maximalen Querbeschleunigung.

<sup>5</sup> In Fällen in denen ein weiterer Spurwechsel während der 10s erfolgt ist, wurde das Zeitfenster bis zu dessen Beginn begrenzt

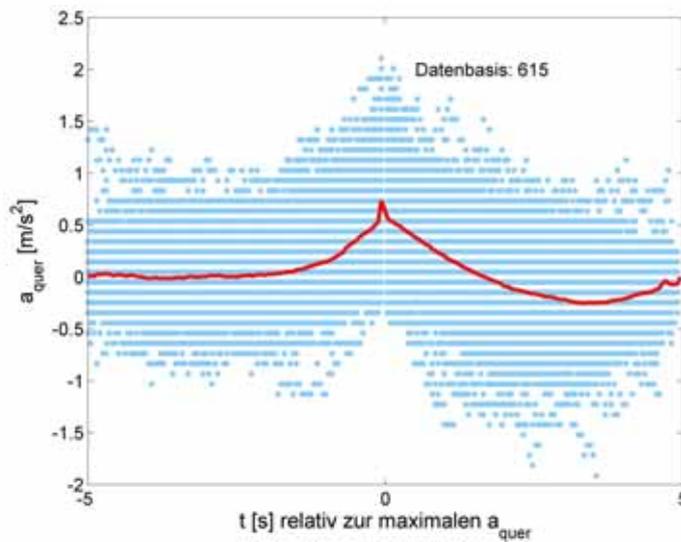


Bild 4.21: Querbeschleunigung relativ zum Maximum

Der ermittelte Maximalwert der Querbeschleunigung über alle Spurwechsel von durchschnittlich  $0,75 \text{ m/s}^2$  bestätigt den von [Schimmelpfennig & Nackenhorst 1985] definierten Normalbereich des Fahrers bei Spurwechseln. Im nächsten Schritt wurde die maximale Querbeschleunigung in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit untersucht. Bild 4.22 zeigt die Punktwolke.

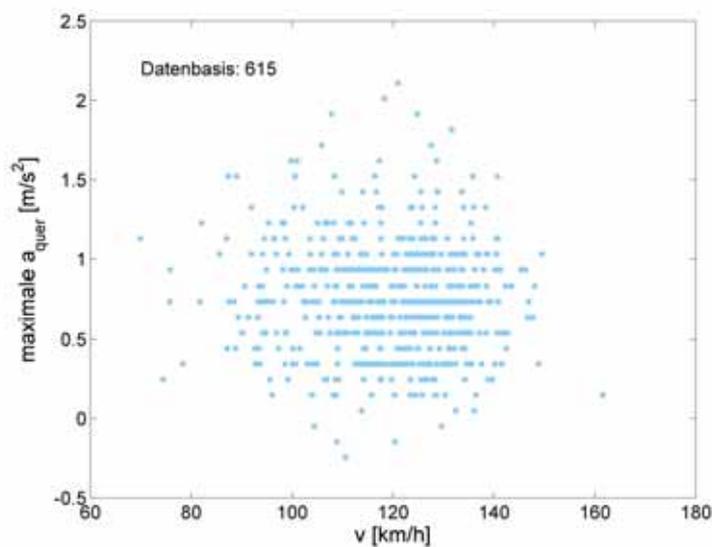


Bild 4.22: Abhängigkeit der Querbeschleunigung von der Fahrgeschwindigkeit

Deutlich wird, dass keine Korrelation zwischen der Fahrgeschwindigkeit und der Querbeschleunigung besteht. Somit ist das gefundene Maximum für den hier untersuchten Geschwindigkeitsbereich von 90-150  $\text{km/h}$  gültig. Dieses Ergebnis bestätigt die Aussagen von [Weiss 1988] und [Sporrer et al. 1998] und steht den Untersuchungen von [Schimmelpfennig & Nackenhorst 1985] entgegen. Anschließend werden die Daten hinsichtlich eines möglichen Einflusses der Verkehrsdichte auf der Zielspur hin untersucht,

die [Sporrer et al. 1998] berichten. Auch diese Ergebnisse konnten nicht bestätigt werden. Die gefundenen maximalen Querbeschleunigungen unterscheiden sich in den Verkehrssituation Lead, Lag, Gap und Free nicht systematisch voneinander (vgl. Bild 4.23).

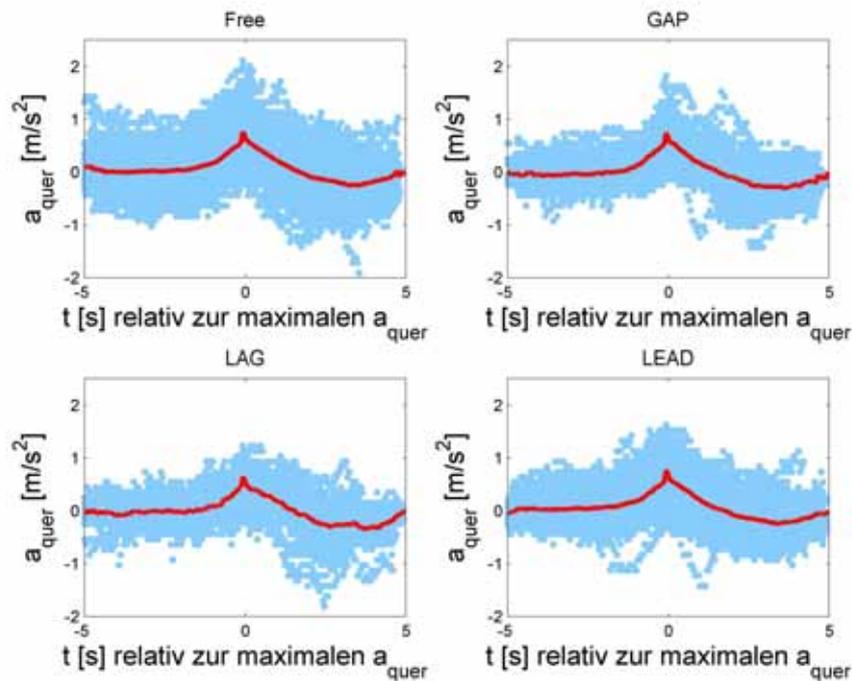


Bild 4.23: Abhängigkeit der Querbeschleunigung von der Verkehrssituation

Zusammenfassend zeigt sich aus der Auswertung der Querbeschleunigung beim Spurwechsel, dass diese weder von der Fahrgeschwindigkeit noch von der Verkehrssituation auf der Zielspur abhängt. Weitergehend konnte ein durchgängiges Maximum von  $0,75 \text{ m/s}^2$  bestätigt werden. Unmittelbar für die Trajektorie bedeutet das, dass bei niedrigen Fahrgeschwindigkeiten der laterale Weg relativ zum longitudinalen Weg schneller zurückgelegt wird als bei hohen Geschwindigkeiten und dass die Spurwechseldauer als konstant angenommen werden kann. Dies deckt sich mit den Aussagen von [Fastenmeier et al. 2001] und [Olsen et al. 2002], die in ihren Studien eine konstante Spurwechseldauer, unabhängig von der Fahrgeschwindigkeit, ermittelt haben.

Für das Trajektoriengenerierungsmodul erfolgt die Bestimmung der mittleren Spurwechseldauer durch die Analyse der Spurwechsel aus den Baseline-Messfahrten aus 2005 und 2006. Zuerst wurden die Fahrten von 2005 und 2006 einzeln betrachtet. Da die Ergebnisse vollständig vergleichbar sind, wird als Datenbasis zur Optimierung die Gesamtheit aller Spurwechsel verwendet. Um die Vergleichbarkeit zwischen allen Spurwechseln zu erreichen, wurde im ersten Schritt eine Bereinigung der Daten um den Anfangsquerversatz zu Spurwechselbeginn vorgenommen. Bild 4.24 zeigt die Kurvenschar aller ausgewerteten Spurwechsel, markiert sind der „mittlere“ Spurwechsel sowie die entsprechenden Standardabweichungen zu allen Zeitpunkten.

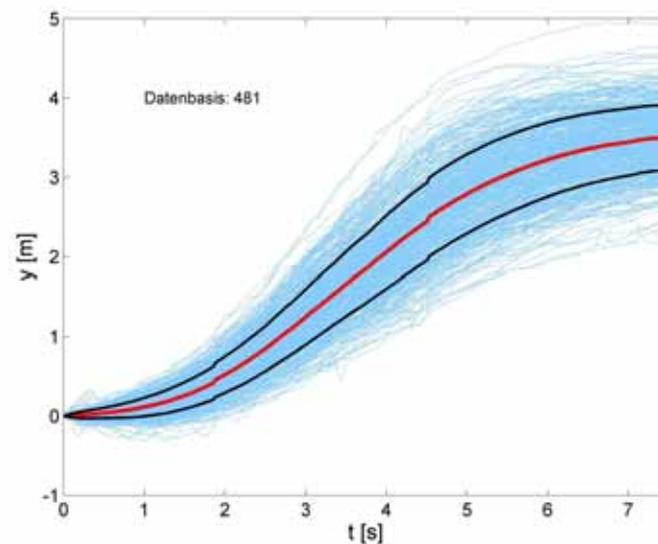


Bild 4.24: Kurvenschar aller Spurwechseltrajektorien

Direkt aus dem Bild ablesbar ist die durchschnittliche Spurwechseldauer  $T_{sw}$  von 7,4s. Diese Dauer liegt auf vergleichbarem Niveau wie bei [Olsen et al. 2002]. Bestätigt werden kann der sinusförmige Verlauf der lateralen Position abhängig von der Zeit. Auch zeigt sich in der lateralen Position während eines Spurwechsels der schon in der Querbeschleunigung gefundene Effekt, dass das Auslenken zu Spurwechselbeginn schneller erfolgt als das Wiedereinlenken in die Zielspur vor Spurwechselende. Für die Prädiktion der Spurwechseltrajektorie wird als Basis eine schräge Sinuslinie, normiert um die Ausweichbreite, eingesetzt, allerdings korrigiert um eine Wurzelfunktion im Nenner, um die Asymmetrie im Kurvenverlauf abbilden zu können. Formel (4.13) zeigt den für die SWU umgesetzten mathematischen Ansatz. Zur Vereinfachung wurde mit Hilfe von trigonometrischen Umformungen die resultierende Sinusfunktion in eine mathematisch einfacher zu beschreibende Cosinusfunktion überführt.

$$y = -\frac{1}{2} \left( \cos \left( \frac{\pi}{\sqrt{n \cdot T_{sw} + z}} \cdot t \right) - 1 \right) \quad (4.13)$$

Zur vollständigen Beschreibung müssen noch die Parameter  $n$  und  $z$  aus den Messdaten ermittelt werden. Dies erfolgt über eine iterative Optimierung bezüglich des minimalen mittleren Fehlers und des maximalen Fehlers zwischen der mittleren realen und der berechneten Trajektorie. Mit diesem Prozess konnten für das Variablenpaar die Werte  $n=0,0504$  und  $z=6,88$  ermittelt werden. Somit lautet die Gleichung zur Beschreibung der Trajektorie wie folgt:

$$y = -\frac{1}{2} \left( \cos \left( \frac{\pi}{\sqrt{0,0504 \cdot 7,4 + 6,88}} \cdot t \right) - 1 \right) \quad (4.14)$$

Die so erzeugte Trajektorie (rote Kurve) bildet die mittlere Spurwechseltrajektorie (blaue Kurve) aus den Messdaten hinreichend gut ab und erfüllt die Forderungen aus der Analyse der Querbeschleunigung (siehe Bild 4.25).

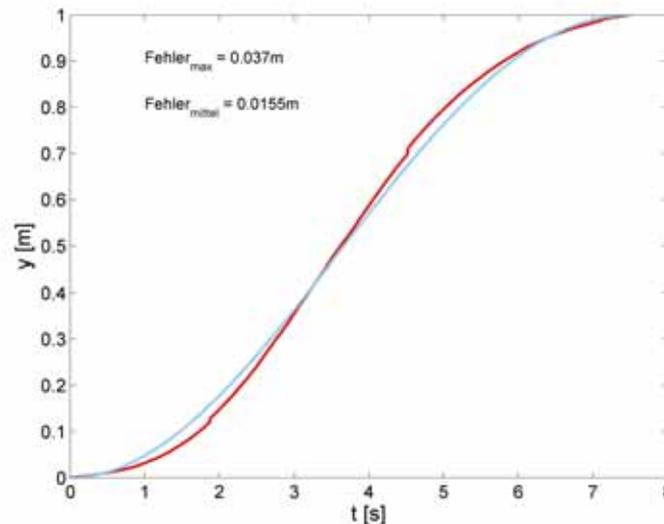


Bild 4.25: Mittlere Spurwechseltrajektorie aus den Messdaten und gewählte mathematische Beschreibungsfunktion

Neben der Beschreibung des lateralen Verlaufs der Spurwechseltrajektorie ist eine differenzierte Analyse der longitudinalen Bewegung des Fahrzeugs während des Spurwechsels nötig. Maßgeblich geprägt wird das longitudinale Verhalten durch die taktische Reaktionszeit zur Identifizierung einer geeigneten Lücke. Nach [Ehmanns 2002] versucht der Fahrer Spurwechsel mit Folgefahrzeug (Lag) zu vermeiden und in Spurwechsel mit Führungsfahrzeug (Lead) zu überführen, konkret heißt das, dass der Fahrer von hinten nahende Fahrzeuge wenn möglich noch passieren lässt und erst dann seinen Spurwechsel beginnt. Mathematisch wird dies über einen Vergleich der vorhandenen Zeitreserve der TTC als auch der  $T_n$  zum Vorderfahrzeug mit der prädizierten Dauer, bis ein Hinterfahrzeug das Ego-Fahrzeug vollständig passiert hat, also keine Beeinflussung über  $TTC_{vl}$  und  $T_{n_{vl}}$  mehr durch das Fahrzeug vorne links vorliegt, erreicht. Bild 4.26 veranschaulicht die zugrunde liegende Verkehrssituation vor und nach dem Passiervorgang.

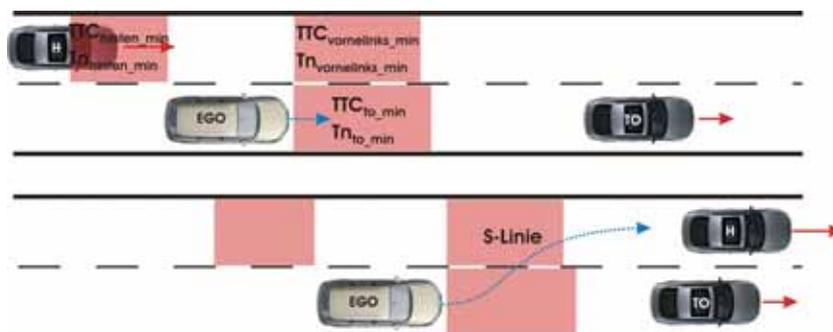


Bild 4.26: Verkehrsszenario Reaktionszeitberechnung

Die Zeitreserve der TTC zum Vorderfahrzeug wird über Formel (4.15), die Zeitreserve der Tn zum Vorderfahrzeug über Formel (4.16) berechnet.

$$\text{Zeitreserve}_{TTC-TO} = \frac{TTC_{TO-\min} - TTC_{TO}}{dTTC_{TO}} \quad (4.15)$$

$$\text{Zeitreserve}_{Tn-TO} = \frac{Tn_{TO-\min} - Tn_{TO}}{dTn_{TO}} \quad (4.16)$$

Anschließend wird das Minimum dieser beiden Zeitreserven ausgewählt und verglichen mit der benötigten Zeit, bis das Hinterfahrzeug das Ego-Fahrzeug vollständig passiert hat und keine Beeinflussung mehr von ihm ausgeht. Erneut erfolgt diese Prädiktion über die TTC und die Tn, diesmal allerdings bezogen auf das Fahrzeug hinten (vgl. Formel (4.17) und (4.18)).

$$\text{Passierzeit}_{TTC} = \frac{TTC_{VL-\min} + TTC_{\text{hinten}}}{dTTC_{\text{hinten}}} \cdot (-1) \quad (4.17)$$

$$\text{Passierzeit}_{Tn} = \frac{Tn_{VL-\min} + Tn_{\text{hinten}}}{dTn_{\text{hinten}}} \cdot (-1) \quad (4.18)$$

Bei den Passierzeiten wird analog die größere der beiden für den Vergleich mit der Zeitreserve ausgewählt. Ist die vorhandene minimale Zeitreserve größer als die maximal benötigte Passierzeit, so wird ein Bremsbeginn des ACC-Systems während der gesamten Vorbeifahrt unterdrückt. Die ermittelte Passierzeit wird dann entsprechend als longitudinales Wegstück innerhalb der Trajektoriengenerierung vor die S-Linie vorangestellt. In allen anderen Situationen wird dieses gerade Wegstück vor der S-Linie als konstant gesetzt und über eine feste Reaktionszeit beschrieben. Als minimale Reaktionszeit wird 0,67s gewählt. Dieser Wert geht auf Untersuchungen von [Schmitt et al. 2006] und [Card et al. 1983] zur Ermittlung von Reaktionszeiten in Verkehrssituationen zurück.

Neben dem Einfluss des taktischen Spurwechselverhaltens wird innerhalb der Prädiktion des longitudinalen Fahrverhaltens kontinuierlich berechnet, ob im Verlauf des Spurwechsels in x-Richtung beschleunigt werden soll. Hierfür wird die Differenz zwischen der aktuellen Fahrgeschwindigkeit und der ACC-Wunschgeschwindigkeit ausgewertet. Aus dieser Differenz folgt unmittelbar über das Beschleunigungskennfeld des ACC-Systems die aktuelle Sollbeschleunigung.

$$a_x \sim (v_{\text{wunsch}} - v_{\text{ist}}) \quad (4.19)$$

Beachtet werden muss dabei, dass diese Beschleunigung nach Funktionsdefinition erst nach dem Ausscherbeginn zum Tragen kommt, da davor die Beschleunigung nach Definition auf 0 m/s<sup>2</sup> während des Annäherungsvorgangs begrenzt wird. Die Beschleunigung und die damit verbundene Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit sind somit nur für den zweiten Teil der S-Linie des Spurwechselforgangs relevant.

Mit Hilfe der Reaktionszeit und der Beschleunigungsdauer sowie der Spurwechseldauer während der Wechselphase ist die Bahnkurve des Spurwechsels zum Zweck der Prädiktion vollständig beschrieben. Für die Analyse der Kritikalität wird die Trajektorie zeitlich

diskretisiert und es werden fünf relevante Punkte des Spurwechsels extrahiert. Bild 4.27 zeigt die fünf Punkte.



Bild 4.27: Diskretisierung der Spurwechseltrajektorie

Nach Definition beschreibt Punkt 1 den aktuellen Zeitpunkt vor der Reaktionszeit. Punkt 2 beschreibt den erwarteten Zeitpunkt nach Ablauf der Reaktionszeit. Die Punkte 3 und 4 kennzeichnen die Überquerung der Fahrspurmarkierung mit der linken vorderen bzw. rechten hinteren Fahrzeugkante. In Punkt 5 ist der Spurwechsel abgeschlossen und das Ego-Fahrzeug befindet sich wieder spurmittig in der Zielspur. Durch die Reduzierung der Trajektorie auf diese fünf relevanten Punkte kann der Rechenaufwand zur Analyse der Kritikalität (Kap 4.3.4.2) deutlich gesenkt werden. Außerdem zeigen diese Punkte genau die Übergänge der einzelnen Spurwechselphasen an und reichen zur Vorhersage der Verkehrssituation aus. Die Prädiktion der umgebenden Fahrzeuge erfolgt hierbei unter der Annahme, dass diese nicht beschleunigen. Sie kann somit über einfache Bewegungsgleichungen (4.20) und (4.21) beschrieben werden.

$$x_{\text{Fahrzeug}} = x_0 + v_0 \cdot t + \frac{1}{2} a_0 \cdot t^2 \quad (4.20)$$

$$v_{\text{Fahrzeug}} = v_0 + a_0 \cdot t \quad \text{mit } a_0 = 0 \quad (4.21)$$

Durch diesen konservativen Ansatz wird gleichzeitig eine Sicherheitsreserve erzeugt, da in verschiedenen Arbeiten gezeigt werden konnte, dass umgebenden Fahrzeugen in Spurwechselsituationen leichte Verzögerungen bis  $1,5 \text{ m/s}^2$  zugemutet werden können (vgl. [Sparmann 1978], [Ehmanns 2002]).

#### 4.3.4.2 Analyse der Kritikalität umgebender Fahrzeuge

Wann zwei Fahrzeuge sich im Verkehr gegenseitig beeinflussen oder behindern, wurde in vielen Untersuchungen erforscht. Allerdings divergieren die Ergebnisse dieser Grundlagenforschung deutlich. Nach [Willmann 1978] ist die Geschwindigkeitsdifferenz der beeinflussende Faktor dafür, ab welchem Abstand ein Fahrzeug als relevant eingestuft wird. Weit entfernte Fahrzeuge werden nur bei hohen Differenzgeschwindigkeiten relevant. Ist die Relativgeschwindigkeit nahe Null, so erfolgt eine Beeinflussung erst in unmittelbarer Nähe. Willmann unterteilt den Grad der Beeinflussung in keine Beeinflussung, potentielle Beeinflussung und aktuelle Beeinflussung bzw. Gefährdung. Zu ähnlichen Ergebnissen gelangen auch [Leutzenbach & Willmann 1975], die in ihren Untersuchungen zeigen, dass die Anforderungen an den Sicherheitsabstand bei negativer Relativgeschwindigkeit deutlich höher ausfallen, als bei positiver Relativgeschwindigkeit. Nach [Brannolte 1980] besteht zwischen zwei aufeinanderfolgenden Fahrzeugen nur unterhalb eines absolut beschriebenen Maximalabstandes von 150 m ein nachweisbarer Zusammenhang. Dieses steht im Gegensatz

zu den gefundenen Ergebnissen von [Leutzenbach 1966], der eine Abhängigkeit der Beeinflussung vom zeitlichen Abstand feststellen konnte. Ein weiterer Ansatz wird von [Kopf 1993] vorgestellt, der als Grenze der Beeinflussung eine Kombination aus einem festen Anteil von 150 m und dem 3-fachen der Wunschgeschwindigkeit, ausgedrückt als Abstand, definiert.

Neben der Beschreibung der Kritikalität umgebender Fahrzeuge über den Abstand wird meistens die Kollisionszeit (TTC) oder die Zeitlücke ( $T_n$ ) verwendet (vgl. z. B. [Färber 1986] und [Sparmann 1978]). In einer Untersuchung von Sparmann wurde der Übergang zwischen beeinflusstem und unbeeinflusstem Fahren unmittelbar vor einem Spurwechsel durch 3,6 s bzw. 1,8 s für einen Spurwechsel nach links bzw. rechts angegeben. In der Analyse werden hierbei die Verkehrssituationen Free, Lag, Lead und Gap unterschieden und die Zeitlücken zu den umgebenden Fahrzeugen unabhängig voneinander untersucht. Der Einfluss der TTC der umgebenden Fahrzeuge wurde bei [Rekersbrink 1994] intensiv untersucht. Hier konnte eine Häufung auslösender TTC-Werte im Bereich 6 s bis 8 s zum Vorderfahrzeug bei Spurwechselbeginn festgestellt werden, wobei bei niedrigeren Geschwindigkeiten verstärkt niedrige TTC beobachtet wurden. Bezogen auf nachfolgende Fahrzeuge (Lag) wurde eine minimale Toleranzschwelle der TTC von 2,2 s gefunden. In einer kombinierten Untersuchung zu TTC und  $T_n$  konnte bei [Fastenmeier et al. 2001] eine Korrelation dieser beiden beschreibenden Größen gefunden werden. So akzeptieren Fahrer sehr niedrige  $T_n$  ( $\sim 0,6$  s) nur dann, wenn gleichzeitig hohe TTC Werte ( $> 3$  s) vorliegen, ansonsten steigt das Sicherheitsbedürfnis, beschrieben über die Zeitlücke, deutlich (auf  $> 1,2$  s) an.

Eine sehr ausführliche Analyse von Spurwechselsituationen bezüglich der Kritikalität und des taktischen Spurwechselbeginns ist in der Arbeit von [Ehmanns 2002] zu finden. Hier wurde eine unterschiedliche Wahrnehmung der Kritikalität des Hinterfahrzeugs (Lag) im Vergleich zum Vorderfahrzeug (Lead) festgestellt. Begründung hierfür ist, dass der Fahrer seine Abstandshaltung zum Vorderfahrzeug direkt durch eigene Aktionen beeinflussen kann, wohingegen er in der Lag Situation indirekt von den Handlungen des Fahrers des Hinterfahrzeugs abhängig ist. Auch dürfte die Einschätzung aufgrund der unterschiedlichen Sicht (Lag im Rückspiegel, Lead durch die Windschutzscheibe) hierfür mit verantwortlich sein. Somit werden zum Vorderfahrzeug auf der Zielspur geringere TTC-Werte (um 0,8 s) akzeptiert; für das Hinterfahrzeug gelten Schwellwerte von ca. 3 s. Klassische auslösende TTC-Werte zu Spurwechselbeginn liegen im Bereich um 5 s, vereinzelt treten innerhalb der Annäherungsphase Werte bis 0,8 s auf. In dichtem Verkehr, in dem häufig Fahrsituationen mit synchronisierten Fahrgeschwindigkeiten mit den umgebenden Fahrzeugen auftreten, bietet die TTC keine Aussagekraft, so dass Ehmanns hier die  $T_n$  zur Situationsanalyse mit verwendet. Bei der Zeitlücke erfolgt keine Differenzierung bezüglich des betrachteten Fahrzeugs vorne, hinten und vorne auf der Zielspur; die minimal akzeptierten zeitlichen Abstände liegen hier nach Ehmanns bei 0,3 s, wobei die  $T_{n,vorne}$  die geringsten Streuungen aufweist. Allgemein wird für alle Bereiche bei erfahrenen Fahrern ein mittlerer Mindestabstand von 0,5 s ermittelt. Außerdem verweist Ehmanns auf Versuche, aus denen er analog zu [Fastenmeier et al. 2001] eine direkte Kopplung von TTC und  $T_n$ , insbesondere bei der Analyse der Kritikalität des Hinterfahrzeugs, gefunden hat. Bei [Hashimoto et al. 2000] wurde die kritische Zeitlücke zum Hinterfahrzeug mittels Regressionsanalyse in Abhängigkeit von der Egogeschwindigkeit, der Relativgeschwindigkeit und der Absolutgeschwindigkeit des

Hinterfahrzeugs untersucht. Die hier gefundenen Ergebnisse beziehen sich allerdings nur auf die sehr geringe Zahl von vier Probanden und sind deshalb nur von geringer Aussagekraft.

Zusammenfassend zeigt sich aus der Literaturrecherche, dass sich die beiden Auswahlkriterien  $T_n$  und TTC zur Beschreibung der Kritikalität einer Verkehrssituation bewährt haben. Auffällig sind jedoch die zum Teil deutlichen Abweichungen der gefundenen Schwellwerte und die wiederholt gefundenen oder vermuteten Abhängigkeiten von der Verkehrsdichte und weiteren längsdynamischen Größen. Deutlich geworden ist weiterhin, dass die umgebenden Fahrzeuge relativ zum Ego-Fahrzeug getrennt von einander betrachtet werden können und müssen.

Die Auswertung der Annäherungs-Spurwechselforgänge aus den Baseline-Fahrten der beiden Probandenstudien stützt sich auf die gewonnenen Erkenntnisse. Alle umgebenden Fahrzeuge werden zeitlich zum Beginn des Spurwechsels (Line Crossing) unabhängig von einander bezüglich ihrer TTC und  $T_n$  Werte untersucht und statistisch ausgewertet. Außerdem werden vermutete Korrelationen von TTC und  $T_n$  analysiert. Ferner werden noch Abhängigkeiten von der Egogeschwindigkeit und Relativgeschwindigkeit hinsichtlich Signifikanz und Aussagekraft überprüft.

Innerhalb der gesamten Auswertung hat sich gezeigt, dass die gefundenen Schwellwerte aus den Daten der Probandenstudie aus 2005 vergleichbar sind zu den separat ermittelten Ergebnissen aus dem Fahrversuch 2006. Aus diesem Grund wird auf eine einzelne Darstellung verzichtet und die Daten jeweils in gemeinsamen Diagrammen für jedes Merkmal zusammengefasst.

### Kollisionszeit zum Vorderfahrzeug:

Bild 4.28 zeigt die Verteilung der Kollisionszeit zum Vorderfahrzeug der 615 analysierten Spurwechsel.

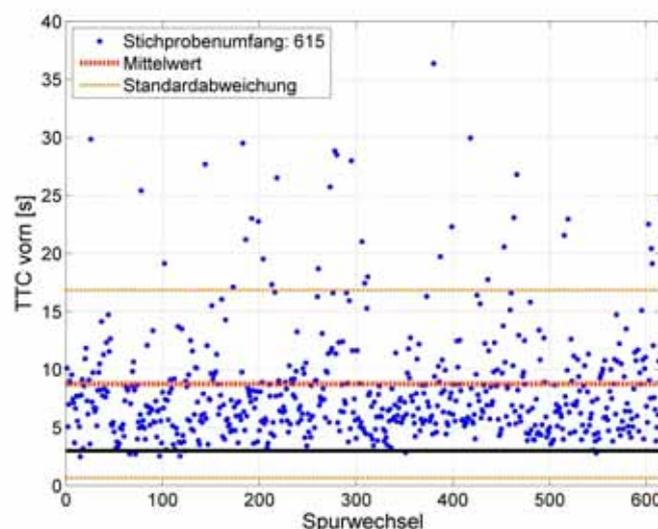


Bild 4.28: Verteilung der TTC zum Vorderfahrzeug

Erkennbar ist ein relativ schmales Band um den Mittelwert 8,8 s, mit einer Häufung im Bereich 3s bis 10s. Deutlich wird das Sicherheitsbedürfnis der Probanden, da unterhalb von 3 s fast keine TTC-Werte zum Vorderfahrzeug aufgetreten sind. Eine signifikante Korrelation der TTC mit der Ego-Geschwindigkeit konnte nicht festgestellt werden. Hingegen ist die Korrelation zur Relativgeschwindigkeit signifikant (Korr. Pearson;  $r=0,430$ ;  $p=0,000^*$ ;  $N=615$ ).

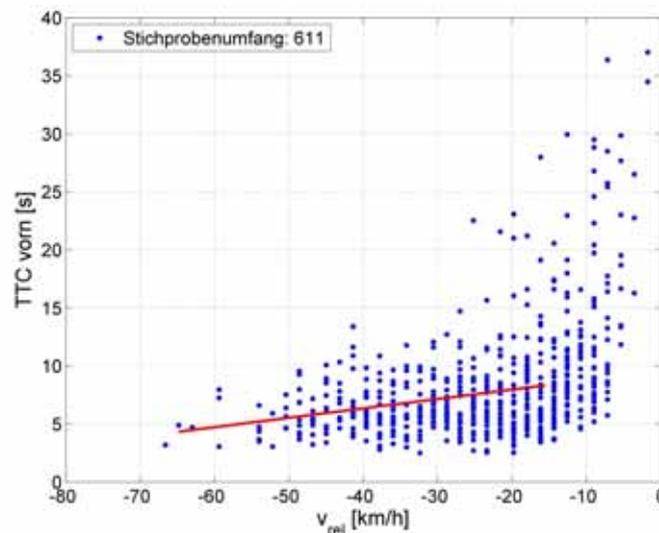


Bild 4.29: Abhängigkeit der TTC zum Vorderfahrzeug von der Relativgeschwindigkeit

Positive Relativgeschwindigkeiten treten nach Definition der Spurwechselklasse Annäherungsspurwechsel (vgl. Kap. 3.7.1.8) in dieser Analyse nicht auf. Aus Bild 4.29 zeigt sich, dass die Streuung bei niedrigen negativen Relativgeschwindigkeiten merklich höher ausfällt als bei hohen negativen Relativgeschwindigkeiten. Hieraus wird deutlich, dass bei niedrigen Relativgeschwindigkeiten die Kritikalität subjektiv vom Fahrer verschieden wahrgenommen wird. Bei hohen Relativgeschwindigkeiten zeigt die geringe Streuung der Messwerte, dass die Kritikalität hier von den Fahrern sehr ähnlich wahrgenommen wird.

### Kollisionszeit zum Vorderfahrzeug auf der Zielspur:

Für die Analyse der Kollisionszeit zu einem Vorderfahrzeug auf der Zielspur konnten 193 Fahrsituationen, wie in Bild 4.30 dargestellt, ausgewertet werden. Bei der Verteilung der TTC-Werte zum Vorderfahrzeug auf der Zielspur fällt auf, dass zirka fünfmal so viele Werte im negativen Bereich liegen wie im Positiven. Dies lässt darauf schließen, dass Spurwechselforgänge häufig begonnen werden, wenn dieses schneller als das Ego-Fahrzeug fährt und sich somit entfernt. Im Bereich 0 bis 10 s TTC konnte nur ein Wert festgestellt werden. Alle positiven TTC-Werte liegen jenseits dieses Grenzwerts und weisen eine sehr große Streuung auf.

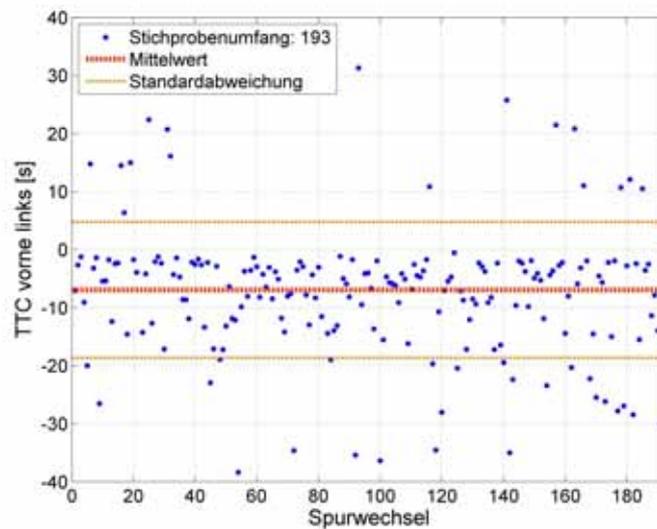


Bild 4.30: Verteilung der TTC zum Vorderfahrzeug auf der Zielspur

Neben dem oben beschriebenen Situationsbewusstsein des Fahrers muss bei der Interpretation auch der eingeschränkte Sichtbereich des Radarsensors im Nahbereich mitberücksichtigt werden. So hat der ACC-Sensor einen Öffnungswinkel von  $16^\circ$ , was die Detektion eines Objekts auf minimal 12,5 m vor dem Ego-Fahrzeug auf der Nebenspur begrenzt. Zusätzliche Störeinflüsse wie Kurvenfahrten oder Verdeckungen durch ein unmittelbares Vorderfahrzeug erhöhen den „toten“ Winkel zusätzlich. Infolgedessen können in den gefundenen TTC-Werten zum Vorderfahrzeug auf der Zielspur sehr geringe Werte aufgrund der Sensoreinschränkungen unterrepräsentiert sein. Auf eine Analyse der Korrelationen der TTC zur Relativgeschwindigkeit oder der Ego-Geschwindigkeit wird aufgrund der hohen Streuung und der damit verbundenen geringen Aussagekraft verzichtet.

#### Kollisionszeit zum Hinterfahrzeug:

Die Auswertung der TTC zum Hinterfahrzeug stützt sich auf 137 analysierbare Situationen. Die Bildung eines Mittelwerts (73,6 s) ist aufgrund der extrem hohen Streuung der Werte (673,8 s) wenig aussagekräftig. Da TTC Werte im Bereich  $\pm 10$  s im Fokus des Interesses stehen, wurde die Skalierung der x-Achse entsprechend gewählt. Dies führt aber gleichzeitig dazu, dass nur ein Teil aller Messwerte in Bild 4.31 dargestellt werden können. Der Mittelwert sowie die Standardabweichungen sind aus demselben Grund grafisch in diesem Bild nicht darstellbar. Auffällig ist einzig und allein, dass in einem Band zwischen 0 und 5 s keine TTC-Werte aufgetreten sind. Erneut muss bei der Interpretation die Sensorreichweite von maximal 50 m berücksichtigt werden. Denn diese bewirkt, dass diejenigen Fahrzeuge nicht in den Häufigkeiten abgebildet sind, die sich mit hoher Relativgeschwindigkeit nähern aber noch weiter als die Sensorreichweite entfernt sind, trotzdem diese Fahrzeuge schon beeinflussend wirken.

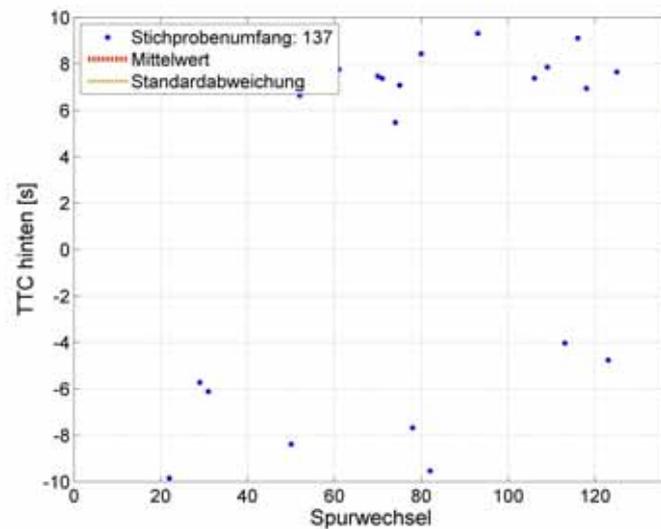


Bild 4.31: Verteilung der TTC zum Hinterfahrzeug

Eine weitere detaillierte Auswertung nach Korrelationen mit der Relativgeschwindigkeit oder der Egogeschwindigkeit ist aufgrund der hohen Streuung der Messwerte nicht sinnvoll.

### Zeitlücke zum Vorderfahrzeug:

Neben den Kollisionszeiten der umgebenden Fahrzeuge werden auch die vorliegenden Zeitlücken zu Beginn eines Spurwechsels analysiert. In Bild 4.32 sind die gemessenen Zeitlücken aller Probanden aus 615 Spurwechselsituationen zusammengestellt.

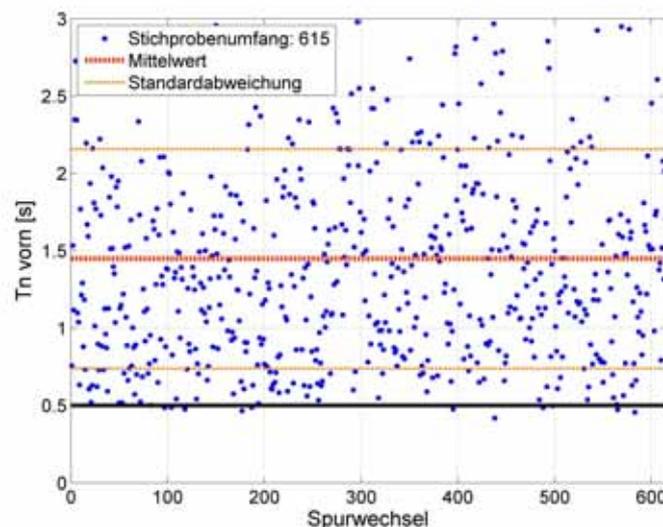


Bild 4.32: Verteilung der Tn zum Vorderfahrzeug

Markiert sind hierbei der Mittelwert von 1,45 s zusammen mit der zugehörigen Standardabweichung von 0,71 s. Deutlich ist ein unterer Grenzwert von 0,5 s zu sehen, unterhalb dessen nur sehr vereinzelt geringere Zeitlücken gemessen wurden. Dieser Wert

repräsentiert das minimale Sicherheitsbedürfnis des Fahrers zum Vorderfahrzeug zu Spurwechselbeginn und liegt deutlich unter dem vom Gesetzgeber geforderten zeitlichen Mindestabstand und den mittleren festgestellten Zeitlücken in Folgefahrtsituationen. Direkt folgt daraus, dass die Fahrer also bewusst den zeitlichen Abstand zum Vorderfahrzeug im Verlauf eines Spurwechsels unterschreiten. Eine Abhängigkeit des Zeitlückenwertes von der Fahrgeschwindigkeit konnte statistisch nicht nachgewiesen werden. Allerdings zeigt die Korrelationsanalyse des Zeitlückenwertes mit der Relativgeschwindigkeit einen signifikanten Zusammenhang (Korr. Pearson;  $r=-0,503$ ;  $p=0,000^*$ ;  $n=615$ ).

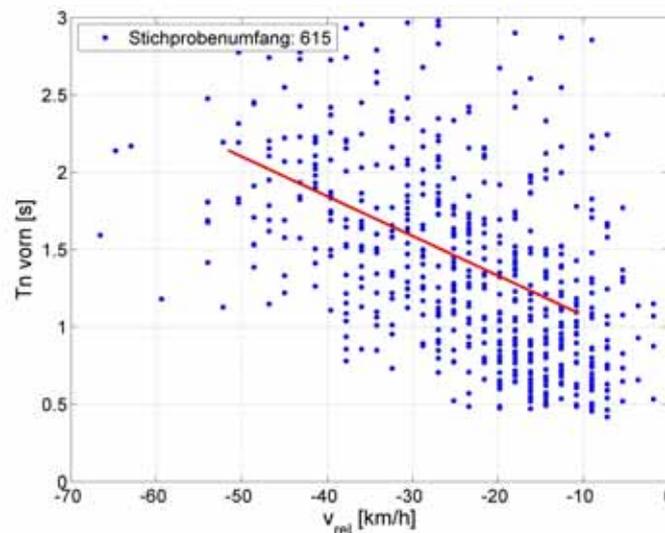


Bild 4.33: Korrelation der  $T_n$  mit der Relativgeschwindigkeit

Aus Bild 4.33 ist erkennbar, dass Fahrer bei hohen Relativgeschwindigkeiten im Mittel nur große zeitliche Abstände akzeptieren und dass sehr kleine Zeitlücken nicht erreicht werden. Analog werden bei geringen Relativgeschwindigkeiten, also bei nahezu synchroner Geschwindigkeit von Ego- und Vorderfahrzeug, verstärkt geringe Zeitlücken akzeptiert. Erneut wird deutlich, dass die objektive Kritikalität, beschrieben über die  $T_n$ , noch um den Einflussfaktor Relativgeschwindigkeit erweitert werden muss, damit die subjektive Einschätzung durch den Fahrer, wann ein Verkehrsszenario kritisch ist, abgebildet werden kann.

#### **Zeitlücke zum Vorderfahrzeug auf der Zielspur:**

Bei der Analyse der Zeitlücke zum Vorderfahrzeug auf der Zielspur muss ebenfalls der beschriebene eingeschränkte Sichtbereich der Sensorik berücksichtigt werden. In Bild 4.34 ist die Verteilung der 238 auswertbaren Zeitlückenwerte dargestellt. Der Mittelwert liegt hier bei 1,5 s mit einer Standardabweichung von 0,85 s. Daneben ist erkennbar, dass nur ein Messwert kleiner als 0,4 s festgestellt werden konnte.

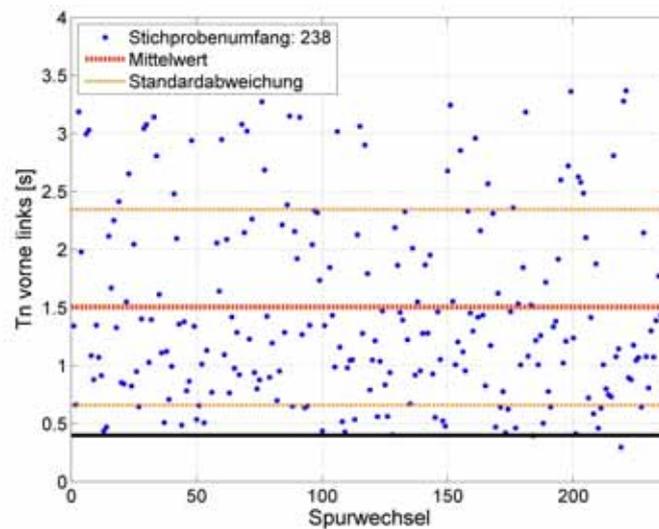


Bild 4.34: Verteilung der  $T_n$  zum Vorderfahrzeug auf der Zielspur

Dieser Grenzwert liegt hierbei geringfügig unter dem ermittelten vergleichbaren Sicherheitsbedürfnis zum Vorderfahrzeug. Begründbar ist diese Unterschreitung dadurch, dass Fahrzeuge, wie in der TTC-Betrachtung erläutert, sich auf der Zielspur häufig vom Ego-Fahrzeug entfernen und somit keine akute Bedrohung darstellen. Signifikante Abhängigkeiten der Zeitlücke von der Fahrgeschwindigkeit oder der Relativgeschwindigkeit konnten nicht festgestellt werden.

### Zeitlücke zum Hinterfahrzeug:

Die Verteilung der 137 Werte der Zeitlücke zum Hinterfahrzeug zum Zeitpunkt des Spurwechselbeginns ist in Bild 4.35 dargestellt.

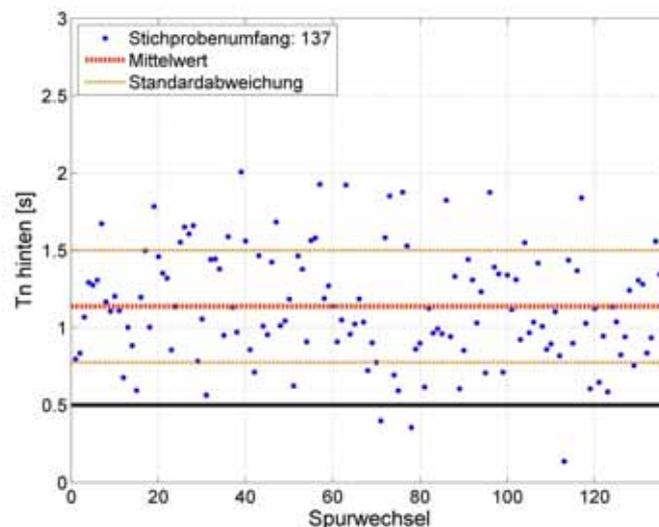


Bild 4.35: Verteilung der  $T_n$  zum Hinterfahrzeug

Wiederum muss der Sichtbereich der Sensorik berücksichtigt werden und der damit verbundene Effekt, dass sehr große Zeitlücken nicht erfasst werden können. Somit liegen der Mittelwert mit 1,14 s und die Standardabweichung von 0,36 s auf niedrigem Niveau.

Darauf ist auch die Zahl von nur 137 Situationen zurückzuführen, die unterhalb des Erwartungswertes für diese Verkehrssituation liegen. Deutlich zeigt sich wiederum das Sicherheitsbedürfnis des Fahrers, das über den unteren festgestellten Grenzwert von 0,5 s beschrieben werden kann. Dieser Wert deckt sich mit den Ergebnissen der Zeitlücke zum Vorderfahrzeug und der Zeitlücke zum Vorderfahrzeug auf der Zielspur. Dass dieser Wert auch beim Hinterfahrzeug gleich niedrig ist, widerspricht der These, dass zum Hinterfahrzeug nur größere Zeitlücken akzeptiert werden (vgl. [Ehmanns 2002]). Eine systematische Abhängigkeit der Zeitlücke von der Fahrgeschwindigkeit oder der Relativgeschwindigkeit konnte statistisch nicht nachgewiesen werden.

Auf Grund von Hinweisen aus der Literatur werden, nach der unabhängigen Analyse der Kriterien TTC und  $T_n$  für die umgebenden Fahrzeuge, diese auch noch kombiniert untersucht (siehe Bild 4.36). Die durchgeführten Korrelationsrechnungen sind für das Hinterfahrzeug und das Vorderfahrzeug auf der Zielspur nicht signifikant. Lediglich für das Zielfahrzeug in der Startspur kann ein schwacher, wenn auch signifikanter Zusammenhang gefunden werden (Korr. Pearson:  $N=615$ ;  $r=0,407$ ;  $p=0,000^*$ ).

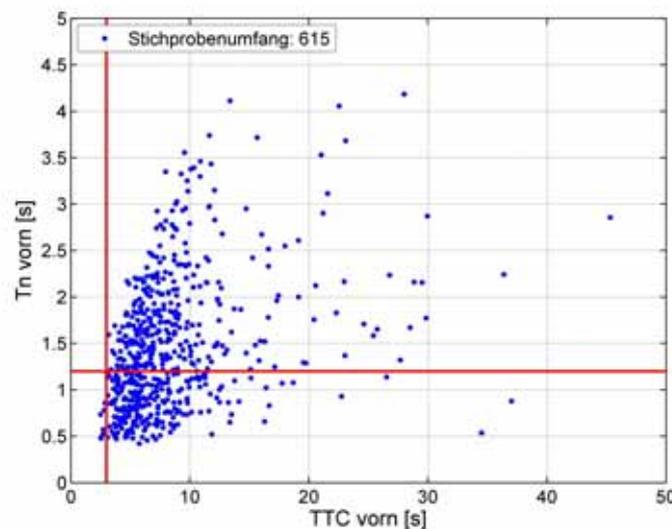


Bild 4.36: Korrelation von TTC und  $T_n$  zum Vorderfahrzeug

Auf Grund der doch deutlichen Streuung der Werte sollte der statistisch signifikante Wert nicht überinterpretiert werden. Die von [Fastenmeier et al. 2001] gefundenen Bereiche, in denen Kombinationen aus TTC und  $T_n$  besonders häufig oder gar nicht auftreten, konnten nicht bestätigt werden.

Zusammenfassend hat die statistische Auswertung gezeigt, dass zur Beschreibung der Kritikalität von Verkehrssituationen die Kennzahlen TTC und die  $T_n$  gut geeignet sind. In Tabelle 4.2 sind die Ergebnisse der zitierten Studien, sowie die gefundenen Schwellwerte dieser Untersuchung zusammengetragen.

<b>Einflussgröße</b>	<i>Sparmann</i>	<i>Rekersbrink</i>	<i>Fastenmeier</i>	<i>Ehmanns</i>	<i>Hashimoto</i>	<i>Eigene Ergebnisse</i>
$TTC_{TO}$	n.u.	n.u.	n.u.	5 s	n.u.	<b>3 s</b>
$TTC_{\text{vornelinks}}$	n.u.	n.u.	n.u.	meist < 0 s	n.u.	<b>&lt; 0 s oder &gt;10 s</b>
$TTC_{\text{hinten}}$	n.u.	2,2 s	n.u.	2,4 s	n.u.	<b>k.A.</b>
$Tn_{TO}$	2,79 s	n.u.	0,50 s	0,5 s	0,3 s	<b>0,5 s</b>
$Tn_{\text{vornelinks}}$	1,08 s	n.u.	0,51 s	0,5 s	0,3 s	<b>0,4 s</b>
$Tn_{\text{hinten}}$	2,62 s	n.u.	0,55 s	0,3 s	0,3 s	<b>0,5 s</b>
n.u.: nicht untersucht, k.A.: keine Aussage möglich						

Tabelle 4.2: Ergebnisübersicht zur Kritikalitätsbewertung ( $TTC$  und  $Tn$ )

Mit der  $TTC$  können insbesondere dynamische Annäherungssituationen eindeutig interpretiert werden. Lediglich bei der Analyse des Zielfahrzeugs auf der Zielspur ist die Aussagekraft der  $TTC$  eingeschränkt. Abhängigkeiten der  $TTC$  von der Fahrgeschwindigkeit konnten nicht bestätigt werden, eine aussagekräftige Abhängigkeit von der Relativgeschwindigkeit konnte nur zum direkten Vorderfahrzeug festgestellt werden. Analog verhält es sich bei der Analyse der Zeitlücke. Erneut ist eine Korrelation nur zwischen der Zeitlücke vorne und der Relativgeschwindigkeit feststellbar. Darüber hinaus konnte bei der  $Tn$  eine durchgängige allgemein gültige Schwelle, die das Sicherheitsbedürfnis des Fahrers repräsentiert, von 0,5 s zu allen Umgebungsfahrzeugen ermittelt werden. Die gewonnenen Erkenntnisse fließen direkt in die Parametrierung der Durchführbarkeit ein. Die gesetzte und somit zu erfüllende Bedingung muss sein, dass die  $Tn$ - und  $TTC$ -Schwellwerte zu allen umgebenden Fahrzeugen an den fünf relevanten Punkten der Trajektorie nicht verletzt werden dürfen. Diese Form der Situationsanalyse ermöglicht auch, die Abbildung des in Kapitel 4.3.4.1 beschriebenen Handlungsmusters, Durchlassen eines schnellen Hinterfahrzeugs. Werden ein oder mehrere Kriterien verletzt, muss die Spurwechselunterstützung deaktiviert werden.

Eine Sonderstellung nehmen die  $TTC$ - und die  $Tn$ -Werte zum Vorderfahrzeug ein. Diese Schwellwerte müssen verantwortungsvoll verwendet werden, damit falls die Spurwechselprädiktion sich nicht erfüllt, eine Bremsung durch das ACC, in den Grenzen von  $3 \text{ m/s}^2$  ohne Übernahmeaufforderung, zur Ausregelung der Annäherungssituation ausreichend ist. Konkret heißt das, dass der erforderliche Bremspunkt häufig zeitlich vor der ermittelten Sicherheitsschwelle des Fahrers bei einem Spurwechsel liegt. Dies widerspricht dem natürlichen Spurwechselverhalten und würde zu unerfreulich frühen Bremsbeginnzeitpunkten und geringer Akzeptanz des ACC/SWU-Systems führen. Gelöst werden kann dieses Dilemma durch die akute Überwachung der Fahrerhandlung mittels der Spurwechselbeginn-Erkennung (Kapitel 4.3.5). Wird während eines Annäherungsvorgangs zweifelsfrei eine aktuelle Spurwechselhandlung detektiert, so kann der Zeitpunkt des Bremsbeginns in Richtung der minimal akzeptierten  $TTC$ - und  $Tn$ -Werte des Sicherheitsbedürfnisses des Fahrers abgesenkt werden. Gleichzeitig eröffnet eine zuverlässige Erkennung der Fahrerhandlung die Möglichkeit, das Zielobjekt auf der Zielspur schneller zu deplausibilisieren und die beschleunigte Phase innerhalb des Spurwechsels früher einzuleiten.

### 4.3.5 Spurwechselbeginn-Erkennung

Im Modul Spurwechselbeginn-Erkennung (siehe Bild 4.2) soll das Einleiten eines Spurwechsels durch den Fahrer frühest möglich mit hoher Zuverlässigkeit erkannt werden. Nötig wird diese Fahrerabsichtserkennung als Rücksetzbedingung für die SWU-Funktion. Daneben wird das Modul verwendet, um das zu überholende Zielobjekt früher zu deplausibilisieren und einen schnelleren Objektwechsel auf das Objekt auf der Zielspur zu ermöglichen. Dies erhöht den flüssigen Ablauf eines Spurwechsels merklich und entspricht der menschlichen Verhaltensweise. Der in Kap. 4.3.4.2 beschriebene Zielkonflikt, dass der letzte Beginnzeitpunkt für eine komfortable Bremsung häufig vor dem vom Fahrer in Spurwechselsituationen akzeptierten Eintauchabstand liegt, kann so aufgelöst werden. Konkret heißt das, dass während der kompletten Annäherungsphase an das Vorderfahrzeug überprüft wird, ob die Prädiktion für einen Spurwechsel aus dem Modul Spurwechselmotivation durch den Fahrer erfüllt wird und dieser den Spurwechsel auch einleitet. Kann eine Spurwechselhandlung vor dem aus Komfortgründen nötigen letzten Bremszeitpunkt detektiert werden, wird ein weiteres kurzfristiges Unterschreiten des Sicherheitsabstandes in der Phase des Ausscherens durch das ACC ermöglicht. Das ACC-System zeigt somit ein dem Menschen entsprechendes situationsadaptives Annäherungsverhalten in diesen Situationen.

Zur Umsetzung der Funktion werden als Indikatoren für einen Spurwechsel der Fahrtrichtungsanzeiger (= Blinker), die Time-to-Line-Crossing (TLC), die Quergeschwindigkeit und der kurvenbereinigte Lenkradwinkel verwendet. Die Definition der TLC geht hierbei auf [Godhelp et al. 1984] zurück, der eine äquivalente Kennzahl für die Querdynamik entsprechend zur TTC in der Längsdynamik schaffen wollte. Die TLC wird in heutigen Lane-Keeping-Assist-Systemen zur Erkennung eines unbeabsichtigten Verlassens der Fahrspur erfolgreich eingesetzt. Die Größe Quergeschwindigkeit ist bisher meistens in ihrer zeitlichen Ableitung als Querbeschleunigung (vgl. Kap. 4.3.4.1) untersucht worden. Daneben sind auch Ansätze zu finden, die aus dem bisherigen Verlauf der Querablage den weiteren Verlauf der Bahnkurve und im Speziellen der Spurwechsel voraussagen wollen (vgl. [Suttrop 2002]). Der Nachteil der Methode der Querablage ist die im zeitlichen Verlauf sehr späte Aussagekraft dieses Signals. Bei [Ehmanns 2002] wird für eine frühe Spurwechseldetektion die Änderung in der Gierrate und der Querbeschleunigung ausgewertet. Beide Signale sind im Versuchsträger verfügbar, liegen allerdings nicht in ausreichender Güte vor, um eine frühzeitige und stabile Prädiktion zu ermöglichen. Der Lenkwinkel oder auch der Lenkradwinkel als Indikator für einen Spurwechsel sind insbesondere aus der Unfallforschung bekannt (vgl. auch [Kretschmer et al. 2006], [Sporrer et al. 1998]). Ansätze, diese Merkmale zu einer Gesamtwahrscheinlichkeit (Lat\_Prob) zu kombinieren, werden bei [Dagli & Reichardt 2002] aufgezeigt. In dieser Kenngröße für einen Überholwunsch werden das Blinkersignal, die Quergeschwindigkeit und das Wissen über den Wegfall der Fahrspur zu einer Kennzahl zusammengefasst.

Für jedes Signal wurde auf Basis der Probandendaten der Fahrstudien aus 2005 und 2006 eine Parametrierung für einen unabhängigen Einzelmotivator geschaffen. Hierbei wurden die gewonnenen Daten aus 2005 für die unmittelbare Parametrierung der Funktion verwendet. Die gefundenen Schwellwerte und Zusammenhänge konnten uneingeschränkt in der

Fahrstudie von 2006 bestätigt werden, so dass im Folgenden die Kriterien für einen Spurwechsel auf Basis beider Datensätze zusammengefasst sind. Aus dieser Analyse des Fahrerhaltens werden Kennlinien und Erfüllungsgrade abgeleitet, ab wann das jeweilige Merkmal einen Spurwechsel eindeutig anzeigt. Durch Linearkombination der einzelnen Motivatoren kann dann eine stabile und zu gleich frühe Erkennung eines Spurwechsels erfolgen.

#### **4.3.5.1 Blinkerbetätigung**

Der Blinker zeigt die unmittelbare Absicht des Fahrers an, einen Spurwechsel durchführen zu wollen. Nach Straßenverkehrsordnung [StVO] muss der Fahrer einen Spurwechsel durch Setzen des Blinkers ankündigen. In der Praxis zeigt sich jedoch, dass viele Fahrer nicht in jeder Spurwechselsituation den Fahrtrichtungsanzeiger verwenden. In einer 2007 vom ADAC veröffentlichten Studie konnte gezeigt werden, dass auf Autobahnen durchschnittlich nur 65% der Fahrer bei einem Spurwechsel blinken [ADAC 2007].

In den ausgewerteten eigenen Fahrstudien lag die Blinkerbetätigung bei 92%. Dieser hohe Wert liegt somit deutlich über dem Erwartungswert und ist mit großer Wahrscheinlichkeit auf Versuchsleitereffekte zurückzuführen. Unter Versuchsleitereffekt versteht man die unbeabsichtigte oder unbewusste Verfälschung des Untersuchungsergebnisses durch den Untersuchungsleiter. In diesem Fall sind hier die Anpassungen des Fahrverhaltens der Probanden aufgrund der Anwesenheit eines Versuchsleiters gemeint. Die „übereifrige“ Verhaltensweise der Probanden ähnelt derjenigen in einer Prüfungssituation, beispielsweise einer Führerscheinprüfung, in der die Fahrer ihr optimales, nicht aber ihr natürliches Fahrverhalten zeigen. Trotz der hohen Blinkernutzung in diesem Fahrversuch ist eine sichere Erkennung der Spurwechselabsicht auch bei Spurwechseln ohne Blinken erforderlich, um eine für den Fahrer erwartbare ACC-Reaktion zu erreichen.

Das Blinkersignal kann als zweiwertige Menge definiert werden: Blinker-AN bzw. Blinker-AUS. Unterschieden werden müssen ein dauerhaftes Blinken, bis der Fahrer den Blinker zurücknimmt oder der Wendepunkt der Bahnkurve erreicht ist und der Blinker sich automatisch zurücksetzt, sowie das Tippblinker (auch Komfortblinker). Letzteres ist gekennzeichnet durch drei Blinkimpulse, die gesetzt werden, wenn der Fahrer den Blinker nur antippt und nicht einrastet. In der Auswertung werden beide Varianten des Blinkens erfasst und ausgewertet. Untersucht wird, wie oft und zu welchem Zeitpunkt vor dem Spurwechsel der Blinker gesetzt wird (siehe Bild 4.37). Nach Definition kennzeichnet der Zeitpunkt 0 s hier und in allen folgenden Diagrammen die Situation, in der die vordere linke Ecke des Fahrzeugs die Spurmarkierung gerade berührt.

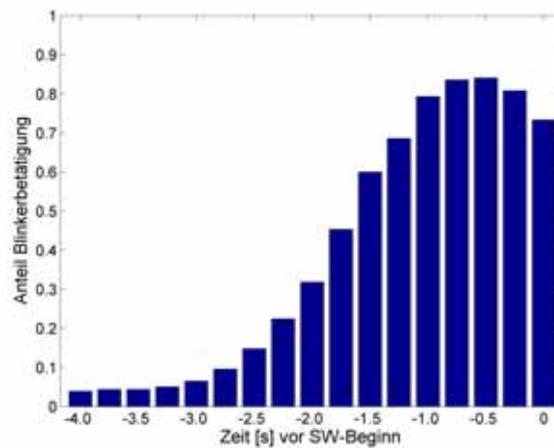


Bild 4.37: Blinkerbenutzung beim Spurwechsel

Die Grafik zeigt im zeitlichen Verlauf eines Spurwechsels, wie viel Prozent der Fahrer den Blinker zu welchem Zeitpunkt gesetzt haben. Bezugsmenge sind hierbei 615 ausgewertete Spurwechsel mit einer Blinkernutzung von gesamt 92%. Deutlich wird, dass eine sichere Aussage, ob ein Spurwechsel folgen wird, durch das Blinkersignal als Indikator im Mittel erst ab 1,5 s vor dem Überqueren der Spurmarkierung möglich wird. Für die Erkennung der aktuellen Überholabsicht liefert der Blinker also einen relativ frühen und stabilen Beitrag.

#### 4.3.5.2 Quergeschwindigkeit

Die Quergeschwindigkeit als Indikator für einen Spurwechsel zu verwenden, resultiert aus den charakteristischen Verläufen des Signals bei einem Spurwechsel (vgl. [Sporrer et al. 1998], [Daimler 2004]). Um aus aufgezeichneten Messfahrten einen Spurwechsel per Hand eindeutig identifizieren zu können, wird häufig der Verlauf der Querabweichung analysiert (vgl. Bild 4.38).

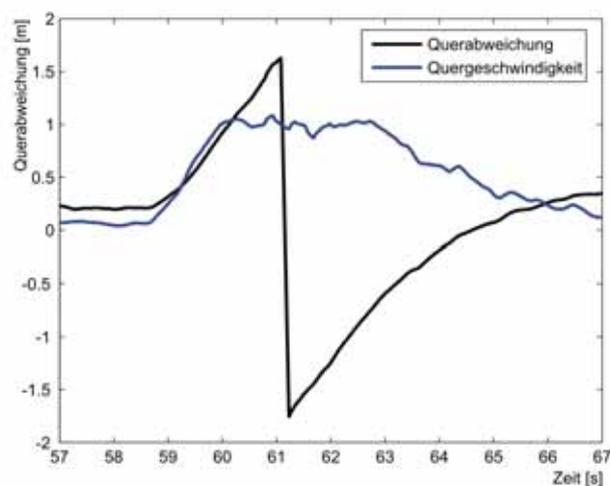


Bild 4.38: Querabweichung beim Spurwechsel

Zur Interpretation ist hierbei nicht der absolute Wert relevant, sondern der signifikante Anstieg inklusive des Vorzeichenwechsels. Befindet sich der Fahrzeugschwerpunkt links der Spurmitte, ist die Querabweichung positiv definiert. Wird im Verlauf des Spurwechsels die Zielspur erreicht, verändert die Querabweichung ihr Vorzeichen, da das Bezugssystem der Bildverarbeitung von der Istspur auf die Zielspur wechselt. Das Ego-Fahrzeug befindet sich also zu Spurwechselbeginn mittig in der Startspur und baut dann eine steigende positive Querabweichung im Bezugssystem Startspur auf. Nach dem Wechsel auf das Bezugssystem Zielspur befindet sich das Fahrzeug hier rechtsversetzt zur Fahrspurmitte. Dies ist durch ein negatives Vorzeichen der Querabweichung beschrieben. Zum Abschluss des Spurwechsels wird die Zielspurmitte erreicht und die Querabweichung nimmt Werte nahe Null an. Die Quergeschwindigkeit wird mit Differenzenquotienten berechnet und mit einem gleitenden Mittelwert aus drei Werten geglättet, um ein stabiles Signal zu erhalten. Im ersten Schritt der Analyse wird der Mittelwert der Quergeschwindigkeit  $v_{\text{quer}}$  über alle Spurwechsel untersucht. Wie in Bild 4.39 zu sehen ist, erreicht die Quergeschwindigkeit erst ungefähr 1,5 s vor dem Spurwechsel einen Wert, der nicht mehr dem normalen Pendeln in der Fahrspur zuzuordnen ist. Erkennbar ist weiterhin, dass die Daten der verschiedenen Fahrstudien in diesem Bereich einen gleichen Verlauf zeigen.

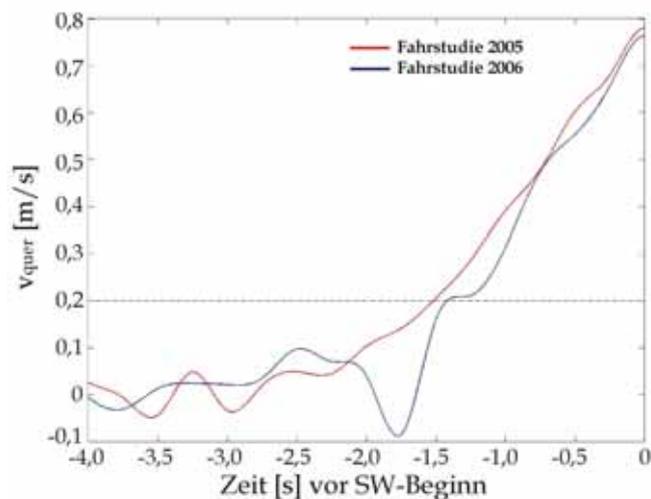


Bild 4.39: Mittelwert der Quergeschwindigkeit während des Spurwechsels

Um in der Absichtserkennung die Größe Quergeschwindigkeit nutzen zu können, werden im nächsten Analyseschritt die absoluten Werte von  $v_{\text{quer}}$  über alle 615 Spurwechsel zu festen Zeitpunkten (0 s, -0,5 s, -1 s und -2 s) vor Spurwechselbeginn analysiert (Bild 4.40).

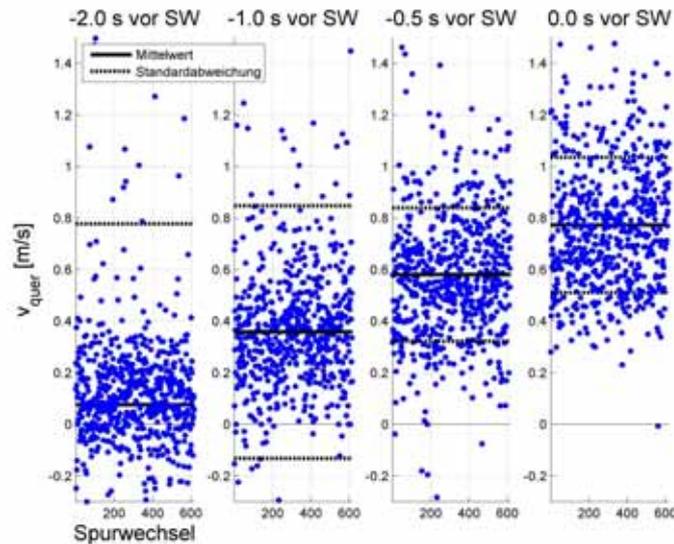


Bild 4.40: Quergeschwindigkeit im Verlauf des Spurwechsels

Zwei Sekunden vor dem SW-Beginn haben nur vereinzelte „Ausreißer“ einen hohen Wert (über 0,6 m/s) und nur wenige Messwerte liegen über 0,3 m/s. Bis zum Überfahren der Spurmarkierung ist analog zum Verlauf des Mittelwerts ein stetiger Anstieg der Quergeschwindigkeit zu beobachten. Erreicht das Fahrzeug die Spurmarkierung (Zeitpunkt 0 s), haben 99% der Spurwechsel eine  $v_{\text{quer}} > 0,3$  m/s, die meisten liegen über 0,6 m/s. Über diese Kennwerte wird die Zugehörigkeitsfunktion für den Motivator Quergeschwindigkeit beschrieben. Zur Modellierung des kontinuierlichen Anstiegs der Quergeschwindigkeit eignet sich ein linearer Übergang.

#### 4.3.5.3 Time To Line Crossing

Die Time-to-Line-Crossing [TLC], also die Zeit bis das Fahrzeug, bei sich nicht ändernder Fahrsituation, die Spurmarkierung erreicht, ist ein wichtiges Kriterium, um einen Spurwechsel zu erkennen. Dieser Kennwert wurde für die Extraktion der Spurwechsel aus den aufgezeichneten Gesamtdaten zur statistischen Auswertung des Spurwechselverhaltens in Kap. 3 und Kap. 5 verwendet. Hierbei wurde der Nulldurchgang der TLC und damit das Ereignis des Überfahrens der Linie geprüft und der Spurwechsel aus den Gesamtdaten herausgelöst. Zum Zweck einer Prädiktion eines Spurwechsels ist die TLC nur bedingt geeignet, da sie erst unmittelbar vor Überqueren der Spurmarkierung eine zuverlässige Aussage zulässt. Zur Berechnung der TLC muss zunächst die Distance-to-Line-Crossing [DLC] ermittelt werden. Diese ist, wie in Bild 4.41 zu sehen, definiert als der Abstand zwischen der linken vorderen Fahrzeugecke und der linken Fahrspurmarkierung.

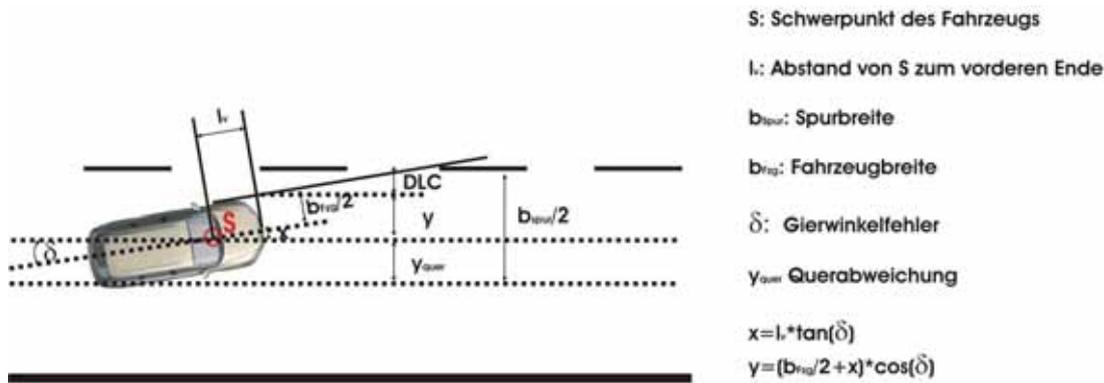


Bild 4.41: Definition der Distance to Line Crossing

Um Sprünge der TLC in der Fahrspurmitte bedingt durch den Vorzeichenwechsel zu vermeiden, wird die TLC nur unter den folgenden Bedingungen berechnet:

- (I.)  $\delta > 0$  Fahrzeug bewegt sich nach links
- (II.)  $y_{quer} > 0$  Fahrzeug befindet sich in der linken Spurhälfte

Mit der Quergeschwindigkeit ( $v_{quer}$ ) und der Hilfsgröße der DLC kann dann die TLC berechnet werden:

$$DLC = \frac{b_{Spur}}{2} - y - y_{quer} \quad (4.22)$$

$$v_{quer} = v_{ego} \cdot \sin(\delta) \quad (4.23)$$

$$TLC = \frac{DLC}{v_{Quer}} = \frac{\frac{b_{Spur}}{2} - y - y_{quer}}{v_{ego} \cdot \sin(\delta)} \quad (4.24)$$

Die Quergeschwindigkeit kann direkt mit dem Gierwinkelfehler berechnet werden. Wird der Spurwechsel gerade eingeleitet, ist der Gierwinkelfehler häufig noch zu ungenau, so dass beim Indikator Quergeschwindigkeit der Differenzenquotient der Querabweichung (mit anschließendem gleitendem Mittelwert) einen stabileren Wert liefert. Nähert sich das Fahrzeug der Spurmarkierung, so dass der TLC-Wert relevant wird, stabilisiert sich der Gierwinkelfehler, und die direkte Berechnung von  $v_{quer}$  ist vorzuziehen. Zunächst wird wieder der Mittelwert über alle Spurwechsel betrachtet (siehe Bild 4.42). Der Unterschied zwischen beiden Fahrstudien ist erneut vernachlässigbar.

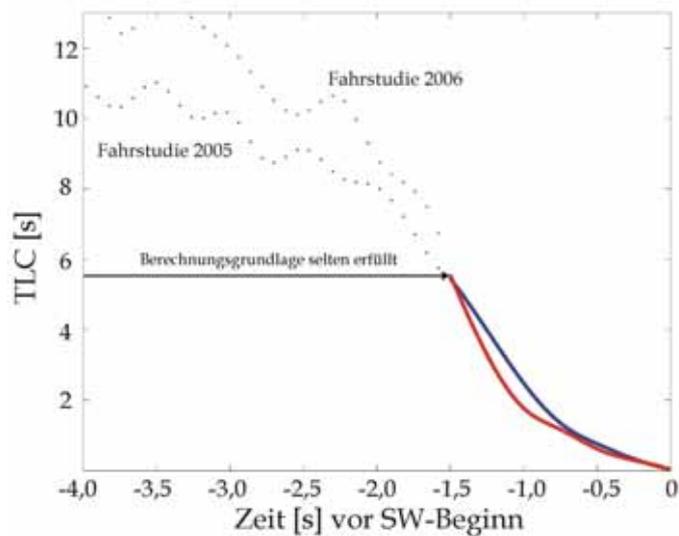


Bild 4.42: Mittelwert der Time to Line Crossing

Wieder zeigt sich, dass eine dezidierte Aussage, ob ein Spurwechsel bevorsteht, auf Basis der TLC erst 1,5 s vor dem SW-Beginn möglich wird. Auch erfüllt erst ab diesem Zeitpunkt die Mehrheit der Spurwechsel die Berechnungsgrundlage, dass sich die Fahrzeuge bereits in der linken Fahrspurhälfte der Startspur befinden und sich nach links bewegen. Außerdem fällt auf, dass die berechnete TLC deutlich größer ist als die reale Zeit bis zum Spurwechselbeginn (vgl. Bild 4.43).

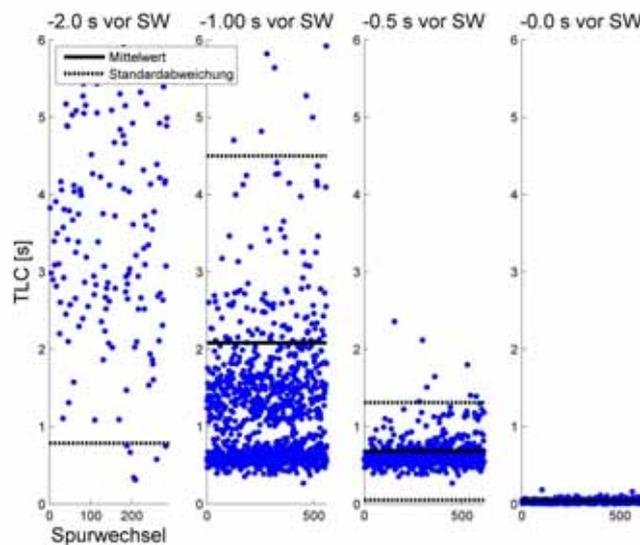


Bild 4.43: TLC im Verlauf des Spurwechsels

Die Begründung hierfür ist, dass die Prädiktion kein weiteres Einlenken des Fahrers berücksichtigt. Die berechnete TLC ist also die noch vorhandene Zeitreserve, wenn der Fahrer den momentanen Lenkwinkel beibehält. Damit ist sie nur zutreffend, wenn sich die Fahrsituation nicht ändert. Ein positiver Lenkwinkel (Lenkstellung nach links) vergrößert

den Gierwinkelfehler, somit auch die Quergeschwindigkeit, und die Abnahme der Time-to-Line-Crossing wird beschleunigt. Für die Parametrierung der Funktion werden, wie in Bild dargestellt, feste Zeitpunkte untersucht. Am Zeitpunkt -2.0 s vor Spurwechsel zeigt sich, dass weniger als die Hälfte der 615 Spurwechsel die Berechnungsgrundlage erfüllen. Der Indikator TLC erlaubt eine verlässliche Voraussage der Spurwechselabsicht erst ab ca. 1 s vor dem tatsächlichen Spurwechselbeginn.

#### 4.3.5.4 Kurvenbereinigter Lenkradwinkel

Neben dem Blinkersignal, der Quergeschwindigkeit und der TLC ist der Lenkradwinkel ein geeigneter Indikator, der früh eine Spurwechselabsicht anzeigt. Durch die geringen akzeptierten Querbeschleunigungen bei Autobahntempo (siehe Kapitel 4.3.4.1) werden auch nur sehr geringe Lenkwinkel um die Mittellage zum Einleiten eines Spurwechsels aufgebracht. Wichtig bei der Nutzung des Lenkwinkels zur Spurwechselbeginn-Erkennung ist ein sicheres Unterscheiden zwischen dem Einfahren in Kurven und dem Beginn eines Spurwechsels. Außerdem muss berücksichtigt werden, ob der Spurwechsel aus Geradeausfahrt erfolgt oder ob sich das Fahrzeug in einer Rechts- oder Linkskurve befindet. Beispielsweise reicht am Kurveneingang einer Rechtskurve ein Geradeausfahren, also Lenkradwinkel = 0, um die Fahrspur nach links zu verlassen. In Linkskurven ist analog ein erhöhter Lenkwinkelbedarf für einen Spurwechsel erforderlich. Aus diesem Grund liefert der Lenkwinkel nur kurvenbereinigt um die momentane Fahrsituation einen hilfreichen Beitrag zur Erkennung der Fahrerabsicht. Der kurvenbereinigte Lenkradwinkel wird nach Formel (4.25) berechnet:

$$\lambda_{kb}(t) = \lambda(t) - \frac{1}{3} \cdot \sum_{i=1}^3 \lambda(t_{-i}) \quad (4.25)$$

Vom aktuellen (absoluten) Lenkradwinkel  $\lambda$  (LRW) wird hier der Mittelwert der letzten drei Werte (Taktrate 50ms) abgezogen, um eine zusätzliche Lenkbewegung zu erkennen. Im Folgenden wird unter dem Lenkradwinkel nur noch der kurvenbereinigte Lenkradwinkel verstanden. Mit dem Verlauf des Mittelwerts über alle Spurwechsel (siehe Bild 4.44) lässt sich die Formel für den Lenkradwinkel besser verstehen. Um den Spurwechsel einzuleiten, wird das Lenkrad nach links bewegt. Der Lenkradwinkel erhält ein positives Vorzeichen.

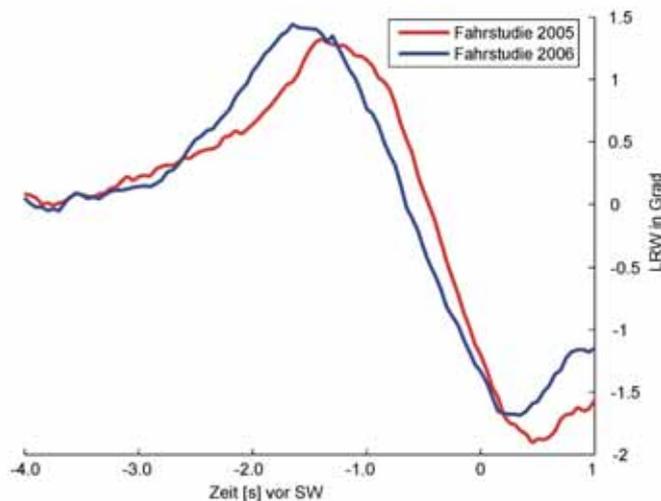


Bild 4.44: Mittelwert des kurvenbereinigten Lenkradwinkels

Noch bevor die Spurmarkierung überquert wird, wird das Lenkrad zur Mittelstellung zurückgeführt. Diese Rechtsbewegung ist am negativen Vorzeichen des Lenkradwinkels zu erkennen. Für das Einleiten eines Spurwechsels nach links wird der Lenkradwinkel folglich einen definierten positiven Wertebereich durchlaufen. Gesamt gesehen entsteht ein etwa sinusförmiger Verlauf. Wie bei der Analyse der TLC und der Quergeschwindigkeit werden auch hier die Lenkradwinkelwerte zu festen Zeiten untersucht. Es zeigt sich, dass keine Verschiebung der Wertelinie erkennbar ist. Exemplarisch ist dies in Bild 4.45 zu sehen. Daneben wird aus diesem Bild die geringe Auflösung des Lenkradwinkelsignals durch den stufenförmigen Verlauf deutlich. Für die Auswertung des Lenkradwinkels wird im Folgenden ein anderes Verfahren verwendet.

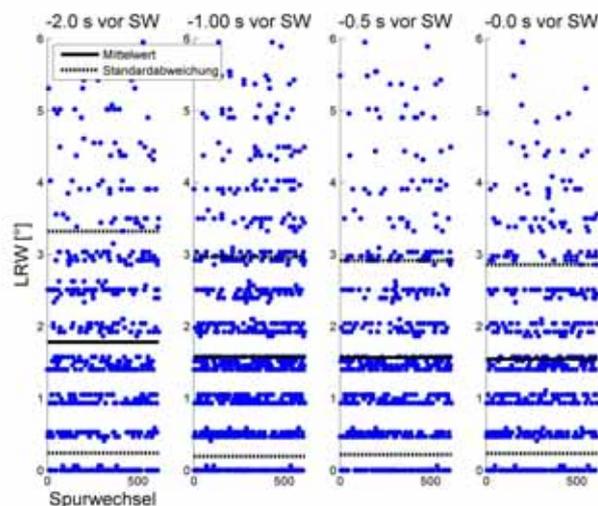


Bild 4.45: Kurvenbereinigter Lenkradwinkel im Verlauf des Spurwechsels

Wie sich aus Untersuchungen zur Servolenkung gezeigt hat, ist es sinnvoll, die Servounterstützung geschwindigkeitsabhängig auszuführen. Hiermit kann dem Phänomen Rechnung getragen werden, dass der erforderliche Lenkradwinkel abhängig von der

Fahrgeschwindigkeit abnimmt. Zusätzlich dazu muss auch die zeitliche Abfolge der Lenkarbeit bei einem Spurwechsel betrachtet werden.

Ein kleiner Lenkradwinkel, z.B. bei hoher Geschwindigkeit, muss zeitlich früher durch den Fahrer gestellt werden als ein großer Lenkeinschlag, der schnell zum Überqueren der Spurmarkierung führt. In Bild 4.46 sind exemplarisch verschiedene Einlenkpunkte und die resultierende Bahnkurve dargestellt. Beide Fahrzeuge erreichen die Spurmarkierung zum gleichen Zeitpunkt.

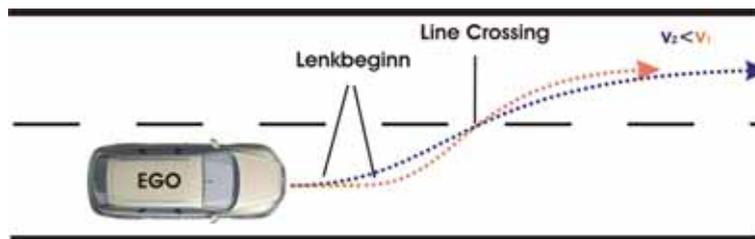


Bild 4.46: Einlenkbeginn beim Spurwechsel

Mit diesem Wissen wird die Analyse des Lenkradwinkels relativ zur zeitlichen Lage des Maximums durchgeführt. Hierzu wird in einem „Suchfenster“ bis 5 Sekunden vor Spurwechselbeginn der maximale Lenkradwinkelwert gesucht. Anschließend werden relativ dazu die Daten 1,5 s vor dem Maximalwert und 1 s danach analysiert. Zusätzlich wird die Geschwindigkeit in fünf Bereiche aufgeteilt. Das Ergebnis ist in Bild 4.47 für verschiedene Geschwindigkeiten dargestellt.

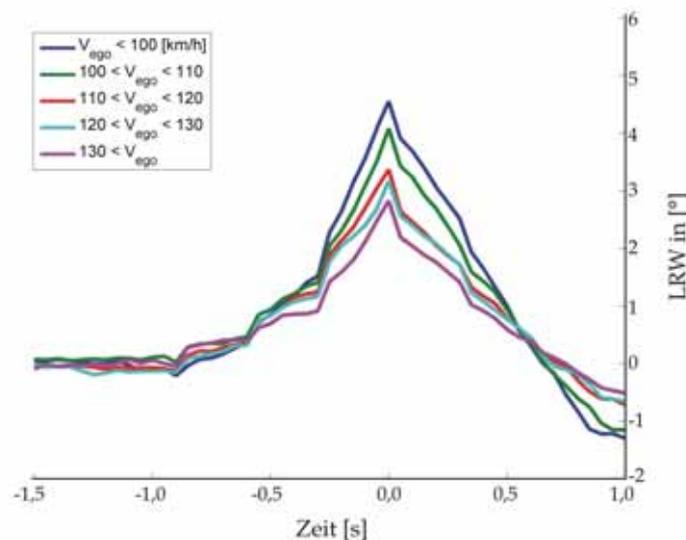


Bild 4.47: Lenkradwinkel relativ zum Maximum

Mit dieser aufgeschlüsselten Betrachtung lässt sich ein vergleichbarer selbständlicher Verlauf des Lenkwinkels abhängig von  $v_{ego}$  erkennen. Qualitativ spiegeln die gefundenen Verläufe den Mittelwert wider. Allerdings sind in der Mittelwertbetrachtung – ohne Berücksichtigung der Abhängigkeit des Lenkradwinkels von der Geschwindigkeit – große Absolutwerte die bei niedrigen Geschwindigkeiten auftreten, überrepräsentiert gegenüber kleineren Lenkrad-

winkelwerten bei hohen Geschwindigkeiten. Betrachtet man den Maximalwert des Lenkradwinkels bei jedem Spurwechsel (innerhalb des Suchfensters), zeigt sich die lineare Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit (Bild 4.48).

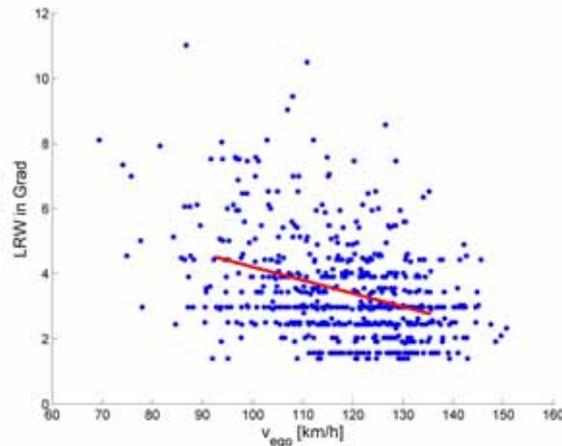


Bild 4.48: Lenkradwinkel abhängig von der Fahrgeschwindigkeit

Im Diagramm sind die aufgetretenen Maximalwerte des Lenkradwinkels mit den zugehörigen Geschwindigkeitswerten aufgetragen. Die Linie repräsentiert das geometrische Mittel und somit die lineare Abhängigkeit des Lenkradwinkels von der Fahrgeschwindigkeit. Mit Hilfe der Korrelationsrechnung konnte dieser systematische Zusammenhang auch statistisch belegt werden (Pearson:  $N=615$ ;  $r=-0,331$ ;  $p=0,000^*$ ).

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass mittels der Kriterien Blinkerbenutzung, Quergeschwindigkeit, Time-to-Line-Crossing und dem kurvenbereinigten Lenkwinkel eine präzise Voraussage der aktuellen Spurwechselabsicht des Fahrers möglich ist. Weiterhin wurde nachgewiesen, dass der Lenkradwinkel als Indikator für einen Spurwechsel kurvenbereinigt und geschwindigkeitsabhängig betrachtet werden muss. Daneben wurde aus der Datenauswertung deutlich, dass mit diesen Methoden zur Erkennung des Spurwechselbeginns eine Voraussage nur bis zu einem Zeithorizont ca. 1,5 s vor dem realen Spurwechsel möglich ist.

Im Weiteren soll auf einen Zielkonflikt in der Parametrierung eingegangen werden. Dieser entsteht zwischen den beiden konkurrierenden Zielen Sicherheit und Frühzeitigkeit der Voraussage. Dieses Dilemma, eine Situation so früh wie möglich vorauszusagen und gleichzeitig keine Fehlauslösungen zu generieren, ist im Bereich der Fahrerassistenz insbesondere bei der Auslegung von Sicherheitssystemen, wie z.B. der automatischen Notbremse, bekannt (vgl. [Homann 2005], [Siedersberger 2004]). Auch im täglichen Leben ist dieses Dilemma, beispielsweise bei der Wetterprognose, zu finden. Gelöst werden kann dieser Konflikt bei der Spurwechselbeginn-Erkennung dadurch, dass neben dem Erkennen der aktuellen Spurwechselhandlung auch die zur Prädiktion genutzte Spurwechselmotivation (Kap. 4.3.3) genutzt wird. Dazu wird die Historie der Spurwechselmotivation mit der Aktionserkennung verknüpft, d.h. ein Spurwechsel wird nur dann als erkannt klassifiziert, wenn im Vorfeld eine Spurwechselmotivation bestanden hat. In einem weiteren Plausibilisierungsschritt wird noch überprüft, ob sich das Fahrzeug aktuell in einem

räumlichen Korridor, beschrieben über die Ausscherzeitlücke, befindet, in dem normalerweise Spurwechsel begonnen werden. Hierzu werden die Daten aus der Analyse des Ausscherzeitpunktes aus Kap. 3.7.1.3 verwendet. Sehr frühe oder sehr späte Spurwechsel relativ zum Vorderfahrzeug werden somit als weniger wahrscheinlich bewertet. Durch dieses Vorgehen konnte der Zielkonflikt „frühe Vorhersage“ versus „Aussagesicherheit“ im Bereich Spurwechselbeginn-Erkennung wirkungsvoll aufgelöst werden. Nähere Details zur Qualität der Spurwechselbeginn-Erkennung sind im Kap 6.4 „Leistungsbewertung“ aufgeführt.

## 4.4 Bypassing des ACC-Systems

Zur Realisierung des situationsadaptiven ACC-Systems auf Basis der vernetzten Fahrerassistenzsysteme ist ein Eingriff in den Annäherungsregler erforderlich. Nähert sich der Fahrer mit ACC/SWU einem langsamen Vorderfahrzeug und wird ein Spurwechsel als wahrscheinlich bewertet, wird ein Bremsen des ACC-Systems vermieden und es werden nur positive Beschleunigungsanforderungen umgesetzt. Hierdurch soll es möglich werden, dass das ACC-System in Spurwechselsituationen ein Verhalten zeigt, das dem von Normalfahrern entspricht und sich mit deren Erwartungswerten deckt.

Aus diesem Grund wurde ein Bypassingprozess für das Serien-ACC entwickelt, der es zulässt, während eines Zeitschritts der Serien-ACC-Funktion den Annäherungsregler in Echtzeit anzupassen. Unter Bypassing versteht man die Auslagerung neuer Steuergeräte-Funktionen auf ein Prototyping-System, während existierender Code nach wie vor auf dem vorhandenen Steuergerät ausgeführt wird [Dspace 2006]. Diese Methode eignet sich besonders zur Optimierung und Entwicklung neuer Funktionen auf bestehender Steuergeräthardware und -software. Für die Realisierung der Bypass-Anwendungen wurde als Echtzeitumgebung eine Autobox DS4121-ECU-Interface-Board und ein Plug-on-Device (POD) der Fa. DSpace im ACC-Entwicklungssteuergerät (EMMA) eingesetzt. Der Datenaustausch erfolgt über einen Dual-Port Memory (DPMEM), der direkt mit dem Adress- und Datenbus des Mikrocontrollers verbunden ist sowie eine auf das Steuergerät zugeschnittene Signalkonditionierung hat. Somit sind Lese- und Schreibzugriffe für den Datenaustausch zwischen zwei Systemen mit geringer Latenz in der Übertragung unabhängig voneinander möglich. Für den Freischnitt und die Kommunikation zwischen den beiden Steuergeräten wird ein angepasstes Real Time Interface (RTI) in Matlab/Simulink Umgebung verwendet. Im Folgenden wird kurz der Aufbau des Bypassing-Systems dargestellt und die Kommunikation zwischen Autobox und EMMA beschrieben. Ein Überblick über den Bypassingprozess ist in Bild 4.49 dargestellt. Der unter Matlab/Simulink und C entwickelte Code der in diesem Kapitel beschriebenen Funktion Spurwechselunterstützung läuft hierbei in Echtzeit auf der Autobox. Die normale ACC-Funktion läuft separat auf dem Entwicklungssteuergerät des ACC-Systems (EMMA) ab.

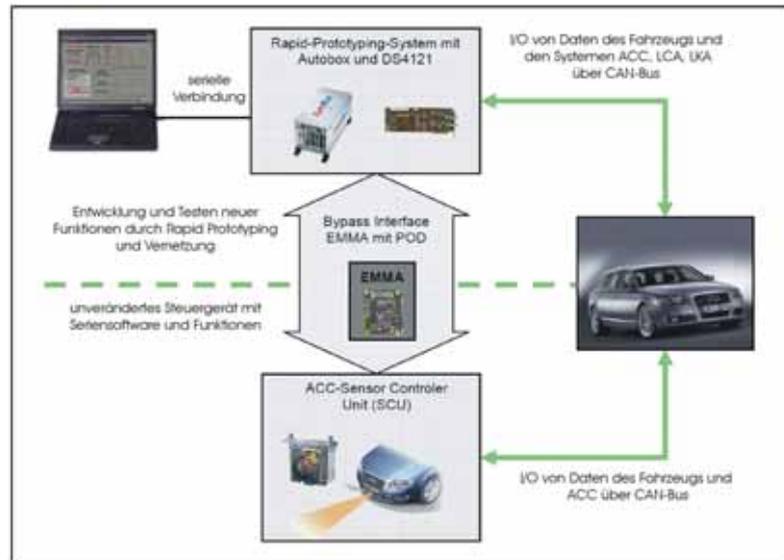


Bild 4.49: Prozess des Bypassings

Um einen sicheren Datenaustausch zwischen Autobox und EMMA garantieren zu können, wurden in das Funktionsmodell Blöcke zur Setupkonfiguration, zum Handshaking und zur Modellidentifikation sowie eine Schnittstellenversion integriert. Als Handshaking werden Mechanismen zur Überwachung und Synchronisierung der Kommunikation zwischen Steuergeräten bezeichnet. Auf Seiten der ACC-Seriensoftware wurde ein entsprechender Freischnitt in das ACC umgesetzt, auf den seitens der Funktion Spurwechselunterstützung von der Autobox aus zugegriffen werden kann. Über definierte Speicherbereiche im Dual-Port Memory erfolgt der Datenaustausch zwischen der prototypischen Funktion und dem Serien-ACC. Ausgetauscht wird vereinfacht gesprochen nur die Beschleunigungsanforderung des Längsreglers in Annäherungssituationen. Liegt keine unterstützbare Situation vor, wird der normale Annäherungsregler verwendet. Handelt es sich hingegen um eine potentielle Spurwechselsituation, die auf Basis der vernetzten Fahrerassistenzsysteme aufgelöst werden kann, erfolgt eine Modifikation der Verzögerungsanfrage des Annäherungsreglers. Erhält der ACC-Regler auf diesem Weg neue Werte für die Längsbeschleunigungsanforderung, so werden diese Werte im aktuellen Zyklus berücksichtigt und das Reglerverhalten entsprechend angepasst.

Dieser relativ aufwendige Prozess des Bypassings wurde gewählt, um garantieren zu können, dass das ACC-Regelverhalten in allen Situationen –mit Ausnahme der neuen situativ unterstützten Situation Spurwechsel– identisch abläuft. Dies ist für die Vergleichbarkeit der ersten Studie (Kap. 3) zur zweiten Fahrstudie (Kap. 5), in der die Funktion auf ihre Wirksamkeit überprüft werden soll, von großer Wichtigkeit. Insbesondere da es sich bei den Probanden in beiden Fahrversuchen nicht um Experten, sondern um Laien im Umgang mit ACC handelt, ist der Gesamteindruck des Systems für die Akzeptanz sehr wichtig, da eine Abstraktionsfähigkeit nur für die Situation Spurwechsel nicht vorausgesetzt werden kann.

## **5 Fahrversuch zur Validierung des situationsadaptiven ACC/SWU-Systems**

In der Probandenstudie 2006 soll der Nachweis erbracht werden, dass situationsadaptive, nutzerzentrierte Fahrerassistenzsysteme sich positiv auf die Akzeptanz und das Fahrverhalten auswirken. Daneben konnte mit den Daten der Messfahrten ohne ACC das Fahrermodell der Funktion Spurwechselunterstützung verifiziert und bestätigt werden. Um eine möglichst hohe Vergleichbarkeit zwischen den Studien zu erreichen, wurden nach Möglichkeit alle kontrollierbaren Variablen gleich gehalten. Die konzeptionellen Rahmenbedingungen wie der Durchführungszeitraum, die ausgewählte Messstrecke und der zeitliche Ablauf der Studie (Beginn, Ende, Dauer), sowie die eingesetzten Fragebögen zur Erfassung der subjektiven Eindrücke der Probanden blieben deshalb identisch. Analog zu 2005 wurde die Messstrecke einmal ohne ACC und einmal mit ACC durchfahren. Innerhalb der Messfahrten wurde wiederum die maximale Höchstgeschwindigkeit auf 140 km/h begrenzt. Um ein vergleichbares Systemverständnis bei den Probanden zu erreichen, wurde das in Kap. 3.4.3 beschriebene ACC-Intensivtraining erneut angewendet. Die Wetterbedingungen während der gesamten Versuchsphase waren durchgängig stabil und trocken und damit gut vergleichbar zur Studie aus dem Jahr 2005. Mit 26 nach identischen Kriterien ausgewählten Probanden waren gleich viele Probanden an dem Fahrversuch beteiligt wie im Jahr 2005. Das eingesetzte Versuchsfahrzeug war dasselbe Fahrzeug wie im Fahrversuch 2005, die ACC-Funktion wurde um die in Kap. 4 beschriebene Spurwechselunterstützungsfunktion erweitert. Infolgedessen wurden bei dem eingesetzten Fragebogen drei Fragen zur direkten Akzeptanz des situationsadaptiven ACC/SWU-Systems hinzugefügt. Während der Fahrt auf der Versuchsstrecke wurden alle Daten der in Kapitel 3.4.1 genannten Sensoren erfasst.

### **5.1 Charakteristik der Probanden**

Die Probanden sollten analog zum Fahrversuch von 2005 nach den gleichen Kriterien ausgewählt werden. Hierbei gab es grundsätzlich zwei Möglichkeiten, die im Folgenden kurz diskutiert werden. Zum ersten der erneute Einsatz der Probanden aus der Studie von 2005 und damit eine Messwiederholung. Dieser Ansatz erlaubt es, die Varianz aufgrund fahrerspezifischer Merkmale zwischen den beiden Fahrstudien auf ein Minimum zu begrenzen. Dadurch wird die Vergleichbarkeit der Stichprobe deutlich verbessert und es können fahrerspezifische Lerneffekte analysiert werden. Die zweite Möglichkeit ist die Suche nach neuen Probanden, die nach identischen Aquirierungskriterien ausgewählt werden. Für das Fahrexperiment wurde auf die zweite Variante zurückgegriffen. Denn zum einen war der Zeitraum zwischen den beiden Studien mit einem Jahr sehr groß, und es war daher nicht garantiert, dass alle Probanden erneut gewonnen werden könnten. Erschwerend kam hinzu, dass einige Probanden nach Ende des ersten Versuchs 2005 auf eigenen Wunsch über das exakte Untersuchungsziel der Probandenstudie aufgeklärt worden waren und somit nicht unvoreingenommen für einen weiteren Versuch zur Verfügung stehen würden. Probanden, die

bereits an einem Fahrexperiment teilgenommen haben, bringen häufig eine andere Erwartungshaltung und einen anderen Wissensstand mit als neue Probanden.

Durch „neue“ Probanden entsteht die Möglichkeit, Aussagen, die über die Baseline von 2005 getroffen wurden, durch die zweite Baseline zu verifizieren und damit auf eine größere statistische Basis zu stellen. Insbesondere für die Klassifikation des Fahrstils sowie die Verifikation des Fahrermodells für die Funktion Spurwechselunterstützung erlaubt diese größere Datenbasis eine besser gesicherte Aussage.

<b>Charakteristik der Probanden</b>
<i>- Anzahl der Probanden: 26 davon 12 weibliche und 14 männliche Fahrer</i>
<i>- Altersverteilung: mittleres Alter 45 Jahre (Min: 30; Max: 64; Std: 10)</i>
<i>- Fahrerfahrung: im Mittel 25 Jahre (Min: 6; Max: 43; Std: 11)</i>
<i>- Nutzer von Fahrzeugen der Ober- oder oberen Mittelklasse</i>
<i>- Tägliche Fahrzeugnutzung</i>
<i>- Autobahnnutzung: 19% täglich, 62% mehrmals oder mindestens einmal pro Woche, 19% seltener</i>

*Tabelle 5.1: Charakteristik der Probanden 2006*

Aus den Daten zur Zusammensetzung der Stichprobe zeigt sich, dass die Fahrstudien der Jahre 2005 und 2006 hinsichtlich ihrer Probandenauswahl als gut vergleichbar bezeichnet werden können.

## **5.2 Ablauf der Probandenstudie**

Der Ablauf des Fahrversuchs zur Analyse von Fahrerhaltensänderungen durch das situationsadaptive ACC war identisch zu dem in Kap. 3.4.3 beschriebenen Ablauf. Die Eingewöhnungsphase an das Versuchsfahrzeug, die Baseline-Messfahrt und das ACC-Training erfolgten nach den identischen Anweisungen durch die Versuchsleiter wie im Jahr 2005. Innerhalb des ACC-Trainings wurde erneut der bewährte Szenarienkatalog von Situationen aus Kap 3.4 verwendet und um ACC/SWU-spezifische Situationen erweitert. Im Speziellen sollten die Probanden Annäherungssituationen mit und ohne Eingriff der Funktion erleben und die veränderten situationsadaptiven Reglerreaktionen kennen lernen. Wurden diese Situationen während des „freien“ Trainings nicht in genügendem Umfang durch das normale Verkehrsgeschehen abgedeckt, wurden noch erforderliche Situationen bewusst durch den Versuchsleiter mittels Anweisungen an den Fahrer provoziert. Im Anschluss folgte die zweite Messfahrt auf der Versuchsstrecke mit aktivem ACC mit Spurwechselunterstützung, in der der Fahrer wieder frei von Anweisungen des Versuchsleiters die Messstrecke abfahren musste. Abgeschlossen wurde die Probandenstudie mit einem Fragebogen, in dem analog zur Fahrstudie aus 2005 Fragen zur Systemakzeptanz und zur Situationsbewertung zu beantworten waren.

## **5.3 Erwartete Änderungen im Fahrerverhalten und der Systemakzeptanz**

Hypothese 1:

Ein situationsadaptives ACC/SWU unterstützt den Fahrer in Spurwechselsituationen effizienter, so dass Spurwechsel aus Freifahrt mit vergleichbar großem Abstand wie in der Fahrt ohne ACC eingeleitet werden. Insgesamt erfolgt eine Angleichung des Verhaltens beim Spurwechsel mit und ohne ACC/SWU.

Hypothese 2:

Die Ausschergeschwindigkeit ist beim Spurwechsel mit und ohne situationsadaptives ACC/SWU vergleichbar hoch und liegt über der Ausschergeschwindigkeit bei der Fahrt mit serienmäßigem ACC.

Hypothese 3:

Fahrer mit situationsadaptivem ACC/SWU zeigen ein ähnliches Spurwechselverhalten (normale Zahl von Spurwechseln) und anteilmäßig gleichhäufiges Fahren auf der linken Spur wie in den Fahrten ohne ACC. Die festgestellten Auffälligkeiten im Fahrverhalten mit dem Serien-ACC zeigen sich mit dem situationsadaptiven, nutzerzentrierten System nicht mehr.

Hypothese 4:

Fahrer fühlen sich beim Spurwechsel durch das vernetzte, fahrerzentrierte ACC/SWU besser unterstützt als bei konventionellem ACC. Ablesbar ist dies direkt aus der geäußerten Akzeptanz aus dem Fragebogen sowie der Häufigkeit von Deaktivierungen und Übertreten per Gaspedal.

Hypothese 5:

Das situationsadaptive Verhalten des ACC/SWU-Systems verbessert die vorausschauende Fahrweise. Abzulesen ist dies an einer geringeren Zahl erforderlicher stärkerer Bremsungen bei gleicher Anzahl erforderlicher Übernahmeaufforderungen.

Hypothese 6:

Der situationsadaptive Eingriff des ACC/SWU-Systems führt zu einer Rückentwicklung hin zu einem normalen Überholverhalten. Ablesbar ist dies an einer Angleichung der Verteilung der freien und frühen, sowie der Annäherungs- und Folge-Spurwechsel zwischen ACC/SWU und der Fahrt ohne ACC.

Hypothese 7:

Die Zahl von manuellem Gaspedalübertreten wird durch das situative Eingreifen der ACC/SWU-Funktion deutlich herabgesetzt gegenüber der entsprechenden Zahl aus der Fahrstudie von 2005.

## 5.4 Probandenzuordnung zu Fahrstilen

Für die Fahrstilclusterung der Fahrstudie 2006 wurde das identische Verfahren aus subjektiven und objektiven Merkmalen, wie in Kap. 3.5 geschildert, verwendet. Die Einteilung in sportlich, normal und komfortabel konnte bestätigt werden. Wiederum hat sich bei der Selbsteinschätzung keiner der Probanden als „sehr sportlich“ oder „sehr komfortabel“ eingestuft. Die meisten Teilnehmer, 58% (N=15), bezeichnen sich selbst als „ausgewogen“; die verbleibenden Fahrer klassifizieren sich als „sportlich“ (42%; N=11). Eine Differenzierung der Stichprobe anhand dieses Items ist erneut nicht möglich. Wie im Fahrversuch von 2005 wurden für die Einteilung die drei durch die Korrelationsanalyse identifizierten Variablen Spurwechsel nach links ( $SW_{Anzahl}$ ), die Durchschnittsgeschwindigkeit ( $v_{Mittel}$ ) sowie die mittlere Zeitlücke zu Vorderfahrzeugen ( $Tn_{Gesamt}$ ) verwendet. Betrachtet man beide Fahrstudien zusammen, so zeigt sich, dass erneut eine signifikante Unterscheidung zwischen sportlichen, moderaten und komfortablen Fahrern möglich ist (vgl. Tabelle 5.2).

N = 52	Cluster 1 (N = 16)	Cluster 2 (N = 22)	Cluster 3 (N = 14)
	<i>sportlich</i>	<i>moderat</i>	<i>komfortabel</i>
$v_{Mittel}$	105,5 (0,71)	103,5 (0,30)	92,9 (-1,28)
$SW_{Anzahl}$	39,2 (1,03)	27,9 (-0,46)	27,1 (-0,45)
$Tn_{Gesamt}$	1,99 (-0,81)	2,02 (-0,03)	2,25 (0,98)
<i>Fahrt ohne ACC – Clusterzentren (z-standardisierte Werte)</i>			

Tabelle 5.2: Gemeinsame Zuordnung des Fahrstils für 2006 und 2005

Insgesamt konnten mit diesem Vorgehen 16 sportliche, 22 moderate und 14 komfortable Fahrer ermittelt werden. Die erneute Prüfung der Korrelation dieser Einteilung nach objektiven Kriterien zur Fremdeinschätzung durch die Versuchsleiter ergibt wiederum einen signifikanten Zusammenhang (Korr. Spearman;  $r=0,364$ ,  $p=0,009^*$ ;  $N=51$ ). Somit konnte die in der Fahrstudie 2005 getroffene Einteilung in Fahrstile anhand der Merkmale Spurwechselanzahl, der Durchschnittsgeschwindigkeit und der mittleren Zeitlücke durch den Fahrversuch von 2006 bestätigt werden.

## 5.5 Fahrerverhaltensänderung und Akzeptanz – subjektive Sicht

Analog zur Fahrstudie von 2005 wird die Dauer der ACC/SWU-Trainingsphase durchweg als ausreichend bewertet (96%). Lediglich ein Proband hätte sich eine längere Trainingsphase mit ACC/SWU gewünscht. Auch das Vertrauen in das ACC/SWU-System wird von 81% als hoch bis sehr hoch bewertet. Beide Attribute sind auch in diesem Fahrversuch wiederum

signifikant miteinander korreliert (Korr. Spearman;  $r=0,635$ ;  $p=0,000^*$ ,  $N=26$ ). Ergänzt man dieses Systemvertrauen noch um den Faktor Verständnis und Transparenz des Systems aus Nutzersicht, so geben 19% an, das ACC/SWU-System sei immer verständlich, die anderen 81% verstanden die Reaktionen des Systems meistens. Keiner der Fahrer äußerte, dass die Funktionsweise und die Reaktionen des Systems gar nicht oder kaum verständlich waren (siehe Bild 5.1).

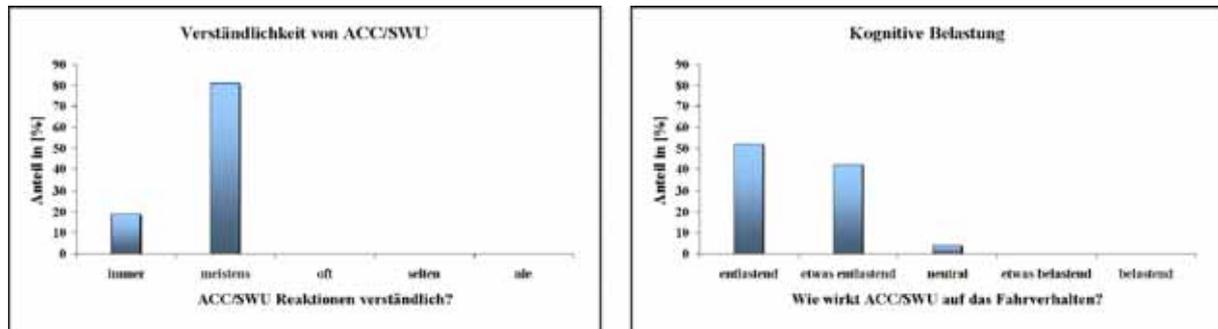


Bild 5.1: ACC/SWU- Reaktion und kognitive Belastung

Dass die Probanden fähig waren, das ACC/SWU-System effizient einzusetzen, zeigt sich darin, dass ähnlich wie 2005 nahezu alle Probanden (96%) ihre kognitive Belastung durch das ACC/SWU-System als stark oder deutlich reduziert empfanden. Eine Verschlechterung durch eine mögliche Intransparenz aufgrund des situationsadaptiven Eingreifens des ACC/SWU-Systems konnte nicht festgestellt werden.

Bei der Frage nach dem Einfluss von ACC/SWU auf das gesamte Fahrverhalten gibt die Mehrheit der Probanden (92%) an, dass das Fahrverhalten mit ACC/SWU ihrem normalen Fahrverhalten entspricht. Dieses Ergebnis ist statistisch signifikant ( $N=26$ ;  $T=8,949$ ;  $p=0,000^*$ ). Hierbei liegt der Wert deutlich über dem Vergleichswert der ersten Probandenstudie. Als erste Erwartung wird diese verbesserte Kompatibilität zwischen Mensch und System dem situationsspezifischen Reglerverhalten zugeschrieben. Die Hypothese Nr. 4, dass sich die Akzeptanz und die Zufriedenheit mit ACC/SWU durch das nutzerzentrierte, situationsadaptive Verhalten sich verbessert, konnte aus der Auswertung dieser Daten bestätigt werden. Vor diesem Hintergrund verwundern die unterschiedlichen Antworten bei der expliziten Nachfrage nach spezifischen Verkehrssituationen. Hierbei beurteilen die Probanden das Überholverhalten tendenziell als relativ normal (61%). Dies stellt im Vergleich zur Fahrstudie 2005 eine Verbesserung dar. Das Abfahrverhalten hingegen wird weiterhin als unnatürlich betrachtet (50%, wobei 12% "keine Unterstützung erwartet hätten"). Dies entspricht dem Erwartungswert, da in dieser Fahrsituation kein Unterschied zwischen den beiden Systemausprägungen des ACC von 2005 und 2006 besteht.

Ähnlich sehen die Ergebnisse bei der Situation Kooperation aufgrund eines einfädelnden Fahrzeugs aus. Für 58% der Probanden entspricht das ACC/SWU-Verhalten in diesen Kooperationssituationen dem normalen Fahrverhalten. Die anderen 38% äußern sich eher negativ, die verbleibenden 4% der Befragten geben an, keine Unterstützung in dieser Fahrsituation erwartet zu haben. Die Wirksamkeit des ACC/SWU-Trainings ist auch an den Lerneffekten beim Abfahren mit ACC/SWU von der Autobahn ablesbar. Hierbei gibt die

knappe Mehrheit von 58% der Probanden an, dass ACC/SWU bei Erreichen des Verzögerungsstreifens immer ausgeschaltet wird, während 34% das System in dieser Situation selten ausschalten.

Zusammenfassend erstaunt auf diesem Detaillierungsgrad die Gegensätzlichkeit der Probandenaussagen, die einerseits ihr Fahrverhalten mit und ohne ACC/SWU als wenig verändert beschreiben, allerdings in den zentralen Fahrsituationen die Unterstützung als nicht ausreichend bewerten. An dieser Stelle ist eine intensive Analyse der objektiven Messdaten, die in Kapitel 5.6 folgt, von großer Wichtigkeit. Wird die Detaillierung noch weiter erhöht, konkretisieren die Fahrer stärker ihre Einschätzung zu bewussten Verhaltensadaptionen. So wird die Überholhäufigkeit bei der Fahrt mit ACC/SWU als geringfügig seltener erlebt und der Zeitpunkt des Überholbeginns von den meisten Fahrern als früher wahrgenommen (vgl. Bild 5.2). Die hier gefundenen Aussagen entsprechen qualitativ in etwa den Bewertungen aus der Fahrstudie von 2005. Die gefundene Korrelation zwischen normaler Überholhäufigkeit und normalem Überholverhalten konnte erneut bestätigt werden. (Korr. Spearman;  $r=0,472$ ;  $p=0,020^*$ ).

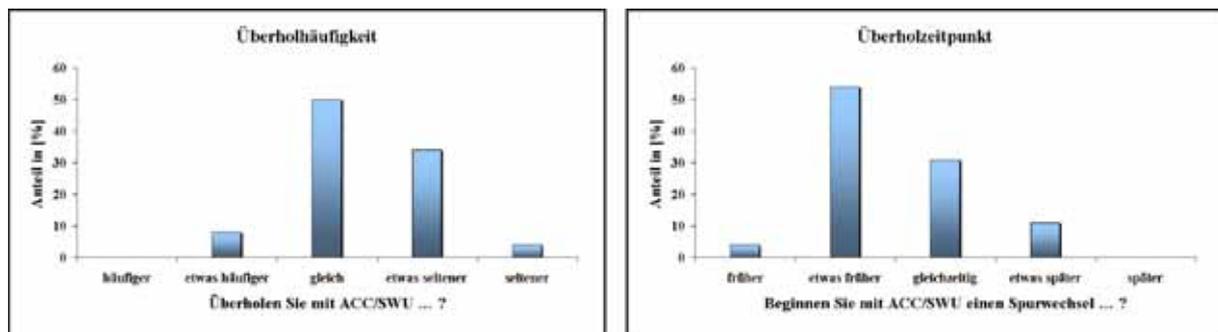


Bild 5.2: Überholzeitpunkt und Überholhäufigkeit

Trotz des situationsspezifischen, fahrerzentrierten Handelns des ACC/SWU-Systems zeigt sich, dass sich zahlenmäßig das Übertreten während der Spurwechsel in der subjektiven Wahrnehmung nicht merklich reduziert hat. So geben 65% der Probanden an, beim Überholen mit ACC/SWU eher selten mit dem Gaspedal zu übertreten. Die restlichen Probanden tun dies nach eigener Angabe in der Hälfte aller Fälle oder häufiger. In Kapitel 5.6 ist das Verhalten beim Übertreten auf Basis der Messdaten genauer untersucht.

Direkt nach der Funktion Spurwechselunterstützung befragt, befinden 42% der Probanden diese für gut und die verbleibenden 58% für sehr gut. Die Abstandsregelung wird als angenehm bis sehr angenehm empfunden. Beide Antworten geben hier nur einen Eindruck wieder, wie die situationsadaptiven Eingriffe unterbewusst wahrgenommen werden. Ein Vergleich zu 2005 ist nicht möglich, da diese Fragen im damaligen Fragenkatalog nicht enthalten waren.

Analog zur Fahrstudie von 2005 wurde erneut abgefragt, welche Grenzsituationen des ACC/SWU-Systems besonders störend auf den Fahrer wirken. Im direkten Vergleich wurden hierbei die Situationen Naheinscherer und Einfädelsituationen, Nebenspurstörungen, Zielobjektverluste von ACC/SWU, das Beschleunigen von ACC/SWU auf Wunschgeschwindigkeit in die Ausfahrt, die Situation Rechtsüberholen durch ACC/SWU

sowie das erschwerte Überholen durch zu frühes Bremsen bewertet. Ergänzt wurde dieser Situationskatalog noch um eine fehlerhafte Reaktion des ACC/SWU-Systems aufgrund einer falschen Prädiktion der Fahrerabsicht, d.h. einen unkomfortablen Annäherungsverlauf, der für den Fahrer spürbar war. Diese Grenzsituationen können vereinfacht in zwei Gruppen eingeteilt werden: zum einen Störungen, die hauptsächlich auf die Sensorik zurückzuführen sind, wie Nebenspurstörungen, Zielobjektverluste oder Naheinscherer und zum anderen funktionale Grenzen des ACC/SWU-Systems wie Einfädelsituation, Rechtsüberholen, Beschleunigen in die Ausfahrt, erschwertes Überholen sowie fehlerhafte Spurwechselprädiktion. Nebenspur-Störungen wurden von 54% der Probanden bemerkt, dies entspricht einer Zunahme von 22% im Vergleich zur vorangegangenen Studie. In der Bewertung, wie störend diese Situation wahrgenommen wird, bleibt die Einschätzung der Probanden vergleichbar, so dass 57% diese Situation als (sehr/eher) störend erlebt haben. Zielobjektverluste traten erneut sehr selten auf und wurden von einer zum Vorjahr vergleichbar großen Gruppe von 19% wahrgenommen und als störend bewertet. Die Situation Naheinscherer, die in der Auswertung in Kap. 3.6 als Referenz zum erschwerten Überholen intensiver analysiert worden ist, wird durch die Probanden ähnlich wahrgenommen wie im Jahr 2005. Erneut wurde diese Situation von fast allen Probanden erlebt (96%). In der Wahrnehmung, wie störend diese Situation empfunden wird, zeigt sich erneut nahezu eine Normalverteilung. Innerhalb der Funktionsstörungen wird das erschwerte Überholen von 81% der Probanden erlebt, dies entspricht den Werten aus der vorangegangenen Studie, damals waren es 88%. Der Erwartungswert, dass die Zahl von Probanden, die diese Situation erlebt haben, rückläufig sein würde, hat sich nicht bestätigt. Bei der Interpretation muss allerdings berücksichtigt werden, dass die Probanden durch das spurwechselspezifische ACC/SWU-Training stärker für diese Situation sensibilisiert wurden als in der Fahrstudie von 2005 (vgl. Bild 5.3). Insgesamt ist durch den Fragebogen nur eine qualitative Bewertung möglich, eine quantitative Analyse wird erst durch die Messdatenauswertung in Kap. 6.3 möglich.

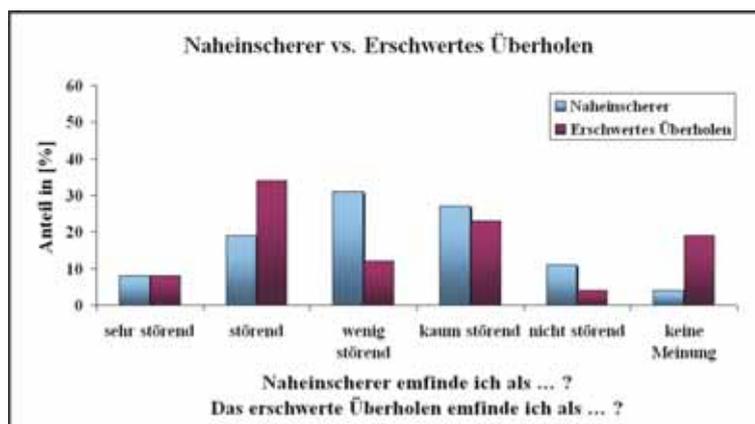


Bild 5.3: Bewertung der Situationen erschwertes Überholen und Naheinscherer

Um neben der Verbesserung durch die situationsadaptiven Eingriffe in Spurwechselsituationen auch mögliche Fehlauflösungen des Systems bewerten zu können, wurden die Probanden nach nicht angemessenen Auslösungen der Funktion Überholunterstützung befragt (siehe Bild 5.4). Bei der Auswertung der Ergebnisse muss berücksichtigt werden, dass die Probanden keine objektive Unterscheidung treffen können, ob

ein unkomfortabler Annäherungsvorgang explizit durch eine fehlerhafte Spurwechselunterstützung ausgelöst wurde oder z.B. durch ein zu spätes Detektieren des Vorderfahrzeugs aufgrund Sensorschwächen des Radarsensors erfolgt ist. Aus diesem Grund darf das Ergebnis erneut nur als erster Eindruck gewertet werden und eine intensive Auswertung der Messdaten ist unabdingbar. Bemerkte wurden unkomfortable Annäherungen an das Vorderfahrzeug von (96%) der Probanden. Bei Auftreten dieses Diskomforts (nach subjektiver Einschätzung der Probanden im Mittel 4-mal) wird diese Situation von 48% der Probanden als (sehr/eher) störend wahrgenommen. 20% der Versuchsteilnehmer äußerten sich „neutral“ und 32% bewerteten die falsche Überholunterstützung als (eher) nicht störend (vgl. Bild 5.4).

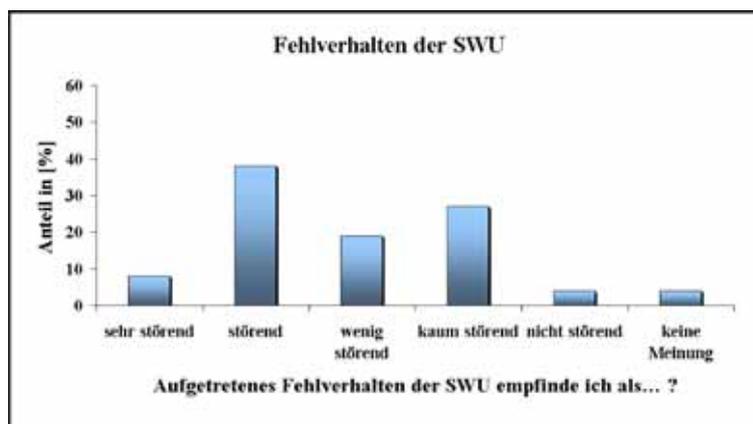


Bild 5.4: Bewertung der Situation falsche Spurwechselunterstützung

Insgesamt zeigt sich, dass die Situation erschwertes Überholen, verbessert durch SWU, nicht mehr die dominante ACC-Grenzsituation ist, wie sie es noch in der Probandenstudie aus dem Jahr 2005 gewesen war. So wird das ungewollte Rechtsüberholen als stärker störend empfunden (43%). Erlebt wurde dieses ACC-Verhalten von 81% der Probanden. Die Situation des einfädelnden Fahrzeuges im Bereich von Autobahnauffahrten registrierten 77% der Versuchsteilnehmer und nur bei 20% wurde dieser Fall als (sehr/etwas) störend bewertet. Die Ergebnisse für diese Situationen sind hierbei vergleichbar zu den Verteilungen aus der Probandenstudie von 2005.

## 5.6 Fahrerverhaltensänderungen – objektive Sicht

Damit sichergestellt werden kann, dass die Fahrstudien 2005 und 2006 direkt miteinander verglichen werden können, wird erneut die exakt identische Auswertungsfunktion eingesetzt, die ausführlich in Kap. 3.7 beschrieben ist. Somit können systematische, auswertungsspezifische Fehler zwischen den Fahrstudien ausgeschlossen werden. Alle ausgewerteten Kriterien sind identisch definiert wie in Kapitel 3.7.1. Die Einteilung der Probanden in Fahrstilklassen konnte analog dem Fahrversuch von 2005 bestätigt werden und ist Grundlage für die differenzierte Auswertung der Merkmale.

Analog zur Datenauswertung des Fahrversuchs von 2005 werden erneut Merkmale analysiert, die die ACC-Nutzung, diesmal mit SWU, durch die Probanden zeigen. Sie werden dann den

Ergebnissen der Probandenstudie von 2005 gegenübergestellt. Während der einstündigen Messfahrt mit ACC war das System in 86% (vgl. 85% 2005) aller Spurwechsel aktiviert. Der hier gefundene Wert ist damit nahezu identisch mit der Nutzung aus dem Jahr 2005. Auch bei der Deaktivierung durch das Bremspedal unterscheiden sich die Werte nur unwesentlich. Wurde 2005 noch im Schnitt 9-mal während der Messfahrt deaktiviert, so steigt diese Quote 2006 geringfügig auf 10 Deaktivierungen per Bremspedal.

Deutlich reduziert hat sich das Übertreten per Gaspedal während der gesamten Messfahrt und besonders in Spurwechselsituationen, womit die Hypothese Nr. 7 bestätigt werden konnte. In der Messfahrt mit dem situationsadaptiven ACC/SWU sank die Zahl der Gaspedalnutzungen zum Zweck des Übertretens auf durchschnittlich 8 und der Anteil von Spurwechseln mit Übertreten auf unter 7%. Im Vergleich zum Serien-ACC konnte also das Übertreten signifikant um fast die Hälfte gesenkt werden (vgl. 2005: 14 mal Übertreten und 15% aller Spurwechsel). Die Wahl der Wunschgeschwindigkeit, beschrieben durch die Differenz zwischen Wunsch- und Istgeschwindigkeit, ist zwischen den beiden Fahrstudien vergleichbar. Die Differenzgeschwindigkeit bei der Fahrt mit ACC und SWU lag bei durchschnittlich 7 km/h und damit geringfügig unter dem Referenzwert von 2005 (8 km/h). Aus der Datenauswertung ergibt sich auch, dass das situationsadaptive ACC/SWU keinen signifikanten Einfluss auf die Anzahl von Fahrerübernahmeaufforderungen hat, obwohl die Werte nominell leicht ansteigen auf 35% ohne Übernahmeaufforderung und 65% mit ein bis drei Übernahmeaufforderungen. Die Forderung, dass sich das ACC in Grenzsituationen durch das situationsadaptive Verhalten bei Spurwechseln nicht verschlechtert, wurde erfüllt. Die Ergebnisse sind in der Tabelle noch einmal übersichtlich aufbereitet.

	Fahrversuch	
	2005 (Basis-ACC)	2006 (ACC/SWU)
ACC-Nutzung	85%	86%
ACC-Deaktivierung	9-mal je Messfahrt	10-mal je Messfahrt
Übertreten per Gaspedal	14-mal je Messfahrt (15% aller Spurwechsel)	8-mal je Messfahrt (7% aller Spurwechsel)
Differenz Wunsch- zu Istgeschwindigkeit	8 km/h	7 km/h

Tabelle 5.3: Nutzung von ACC bzw. ACC/SWU

Alle in diesem Abschnitt betrachteten Merkmale sind unabhängig vom Fahrstil für alle Probanden gültig. Im Folgenden werden diejenigen Merkmale betrachtet, bei denen ein Einfluss zwischen der Fahrt mit und ohne ACC erwartet worden ist und dies entweder bestätigt oder widerlegt werden konnte. Um Verwechslungen mit Ergebnissen zu vermeiden, wird im Kontext der Fahrstudie 2006 das eingesetzte situationsadaptive, fahrerzentrierte, vernetzte ACC als ACC mit Spurwechselunterstützung (ACC/SWU) bezeichnet.

### 5.6.1.1 Mittlere Durchschnittsgeschwindigkeit

Innerhalb der Fahrstudie von 2006 liegt die mittlere Dauer der Versuchsfahrt mit ACC/SWU bei 58 Minuten und 16 Sekunden (Std: 2 Min 38 Sek) auf vergleichbarem Niveau wie die Dauer der Fahrt ohne ACC mit 60 Minuten und 1 Sekunde (Std: 3 Min 10 Sek).

Bei der durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeit zeigt sich wie erwartet sowohl für die Messfahrt mit ACC/SWU als auch für die Fahrt ohne ACC, dass komfortable Fahrer langsamer fahren als sportliche und moderate Fahrer. Der festgestellte Effekt zeigt sich innerhalb der ACC/SWU Fahrt schwächer, hier liegt die Differenz zwischen sportlich und komfortabel bei durchschnittlich 4 km/h, während sie bei der Messfahrt ohne ACC bei über 11 km/h liegt (vgl. Bild 5.5).

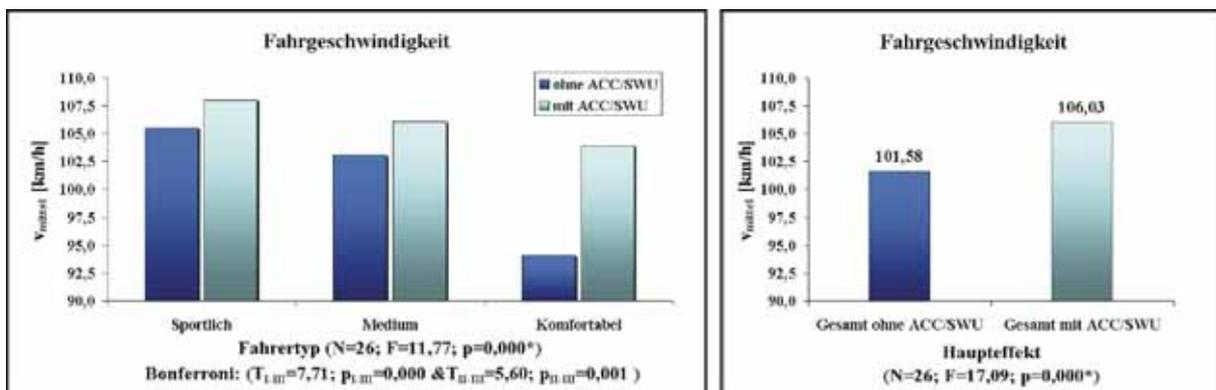


Bild 5.5: Veränderung der Durchschnittsgeschwindigkeit

Deutlich wird, dass mit ACC/SWU generell unabhängig vom Fahrstil signifikant schneller gefahren wird und dass fahrstilspezifische Unterschiede in der Geschwindigkeitswahl durch ACC/SWU harmonisiert werden. Hier ist bei der Gruppe der komfortablen Fahrer der größte Zuwachs von durchschnittlich 94,1 km/h bei der Fahrt ohne ACC auf 103,9 km/h bei der Fahrt mit ACC/SWU feststellbar.

### 5.6.1.2 Spurwechselhäufigkeit

Die Auswertung der Überholhäufigkeit aus den Messdaten von 2006 (Bild 5.6) zeigt, dass keine systematischen Unterschiede mehr zwischen der Fahrt mit und ohne ACC/SWU bestehen. Es wird deutlich, dass die Fahrer mit dem in Spurwechselsituationen verbesserten ACC ein natürliches Spurwechselverhalten bezogen auf die Anzahl der Fahrspurwechsel zeigen. Eine Abhängigkeit der Spurwechselanzahl vom Fahrstil ist wie erwartet noch vorhanden.

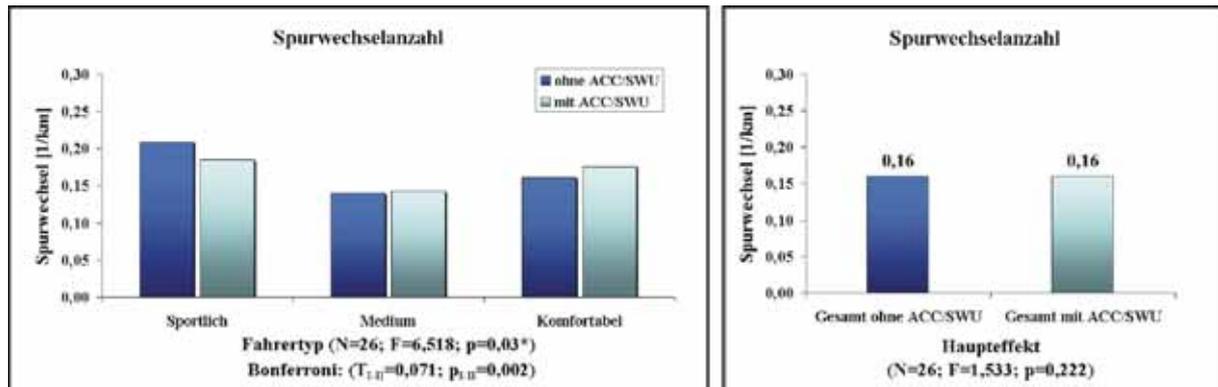


Bild 5.6: Veränderung der Spurwechselanzahl

Hierbei wechseln sportliche Fahrer entsprechend der Erwartungen aus der Clusteranalyse häufiger die Fahrspur als komfortable Probanden. Die Hypothese Nr. 2, dass sich durch den situationsadaptiven Eingriff in Spurwechselsituationen die Spurwechselanzahl bezogen auf die Fahrt ohne ACC wieder angleicht und keine signifikanten Abweichungen mehr bestehen würden, konnte bestätigt werden.

### 5.6.1.3 Ausscherabstand

Ein weiteres wichtiges Merkmal zur Beschreibung des Spurwechselverhaltens ist der Ausscherzeitpunkt bei einem Spurwechsel und der damit verbundene Ausscherabstand. Hierbei zeigt sich analog zum Fahrversuch 2005, dass auch mit ACC/SWU ein statistisch signifikanter, größerer Abstand zu Beginn des Überholvorgangs vorliegt als in der jeweiligen Fahrt ohne ACC (vgl. Bild 5.7).

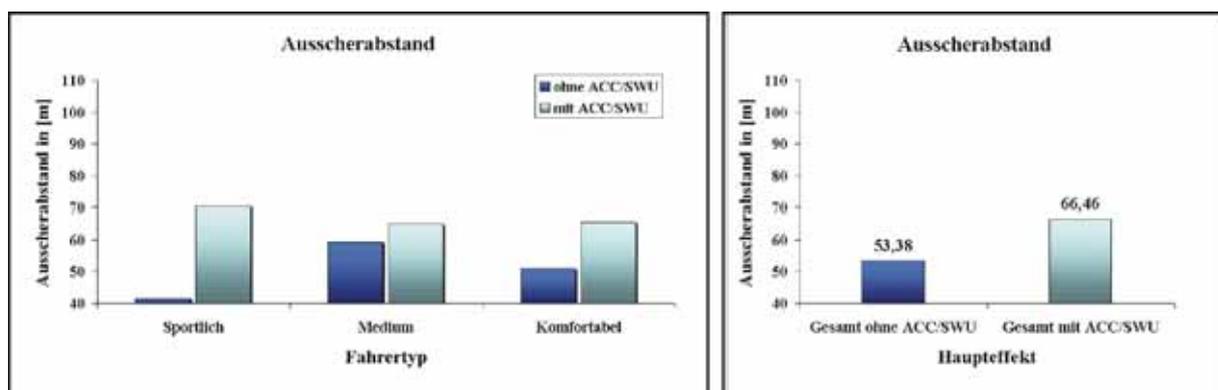


Bild 5.7: Veränderung des Ausscherabstands

Zu erkennen ist, dass die Differenz zwischen der Fahrt mit ACC/SWU (66,5 m) und ohne ACC (53,4 m) im Mittel bei 13,1 m liegt. Gerade sportliche Fahrer verlegen ihren Spurwechselbeginn bezogen auf die Fahrt ohne ACC auch mit ACC/SWU zeitlich nach vorne. Setzt man die Ergebnisse in Beziehung zu denen aus der Fahrstudie 2005 mit dem Serien-ACC, wird deutlich, dass sich die Abweichungen zwischen der Fahrt ohne ACC und der unterstützten Fahrt durch den situativen Eingriff zurückgebildet haben. Insbesondere das Eintauchen, und somit das kurzfristige Unterschreiten des Sollabstandes bei einem

bevorstehenden Spurwechsel, wird durch den situationsadaptiven Reglereingriff bewusst ermöglicht. Insofern kann die bestehende Verhaltensadaptation, insbesondere der sportlichen Fahrer, erklärt werden aus der sicherheitsbewusste Parametrierung des Zeitpunkts, an dem die Funktion die Bremsung trotz Spurwechselprädiktion einleitet. Bei der Parametrierung der Funktion wurde die Sicherheit für den Fahrer und die Vermeidung kritischer Fahrsituationen als oberstes Ziel definiert. So werden in Spurwechselsituationen bewusst sehr knappe Manöver nicht unterstützt, die der Fahrer sich selber bei Fahrten ohne ACC und einer eindeutigen Situationseinschätzung zugesteht, jedoch bei einem Fahrerassistenzsystem als bedrohlich bis potentiell gefährlich einstufen würde.

#### 5.6.1.4 Ausscherdifferenzgeschwindigkeit

Neben dem Ausscherabstand ist die Ausscherdifferenzgeschwindigkeit ein wichtiges Merkmal, das beschreibt, ob der Fahrer durch zu frühe Bremseneingriffe des ACC/SWU-Systems beeinflusst worden ist, da diese direkt zu einer Absenkung der Differenzgeschwindigkeit führen. Aus Bild 5.8 ist erkennbar, dass sich die Differenzgeschwindigkeit bei der Fahrt mit ACC/SWU an diejenige bei der Fahrt ohne ACC annähert. Systematische Unterschiede zwischen den beiden Fahrten sind nicht mehr feststellbar, wodurch die Hypothese Nr. 2 bestätigt wurde.

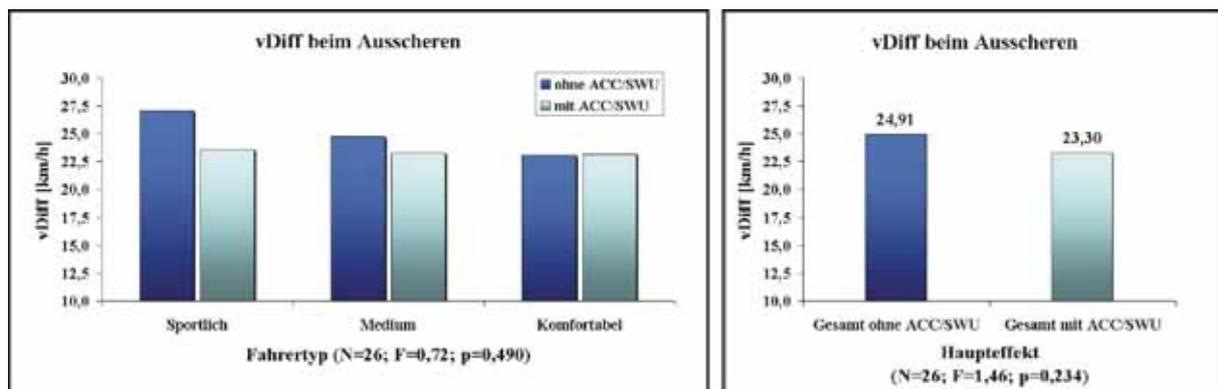


Bild 5.8: Veränderung der Ausschergeschwindigkeit

Nur noch bei der Gruppe der sportlichen Fahrer (mit ACC/SWU: 23,6 km/h; ohne ACC 27,1 km/h) ist eine Abweichung zwischen der Fahrt mit und ohne ACC/SWU erkennbar, die aber statistisch nicht signifikant ist. Zurückzuführen ist diese Annäherung der Differenzgeschwindigkeiten zwischen den beiden Messfahrten auf die Spurwechselunterstützungsfunktion, da innerhalb der Annäherungssituation auf ein langsames Vorderfahrzeug unnötiges Bremsen durch die Funktion situationsadaptiv unterdrückt wird. Hierdurch bleibt die Differenzgeschwindigkeit während der gesamten Annäherung erhalten. Dies entspricht dem Verhalten von Normalfahrern, die Spurwechsel auf der Autobahn normalerweise mit konstanter Fahrgeschwindigkeit oder moderatem Beschleunigen einleiten.

### 5.6.1.5 Wechseldauer

Die Spurwechseldauer ändert sich bei der Fahrt mit und ohne ACC/SWU nicht signifikant. Im Mittel liegt die Dauer mit ACC/SWU bei 1,82 s und ohne ACC bei 1,96 s. Die ermittelten Ergebnisse sind in Bild 5.9 zu sehen.

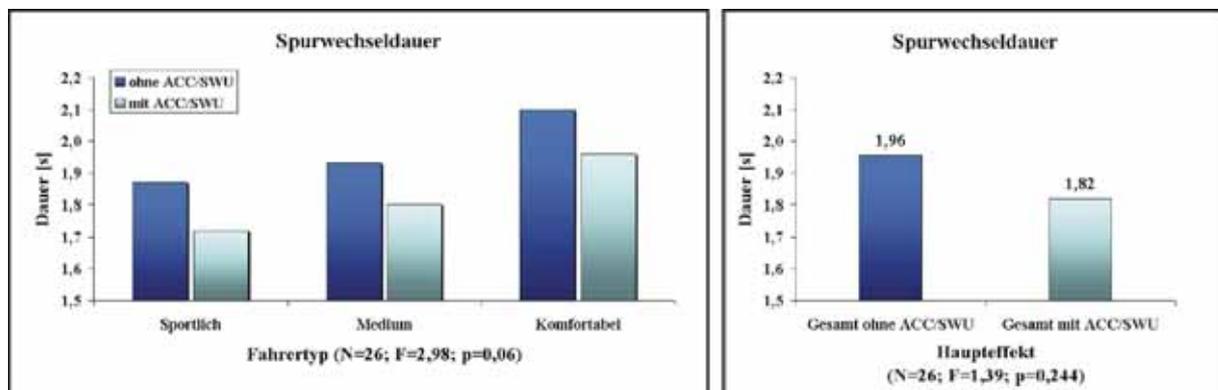


Bild 5.9: Veränderung der Wechseldauer

Eine signifikante Abhängigkeit dieses Spurwechselparameters vom Fahrstil konnte nicht festgestellt werden.

### 5.6.1.6 Fahrspurwahl

Einen direkten Einfluss auf das Spurwechselverhalten hat die Wahl der Fahrspur. Im Vergleich zum Fahrversuch von 2005 hat sich in der Studie von 2006 der Anteil von Fahrten auf der linken Spur sowohl mit als auch ohne ACC/SWU erhöht. Dieser Unterschied zwischen den beiden Fahrversuchen wird in Kap. 6.1 näher analysiert. Ein systematischer Unterschied zwischen der Fahrt mit und ohne ACC/SWU besteht im Fahrversuch 2006 jedoch nicht. Im Mittel steigt die Nutzungsdauer der linken Fahrspur von 20% in der Fahrt ohne ACC auf 24% in der Fahrt mit ACC/SWU an (siehe Bild 5.10).

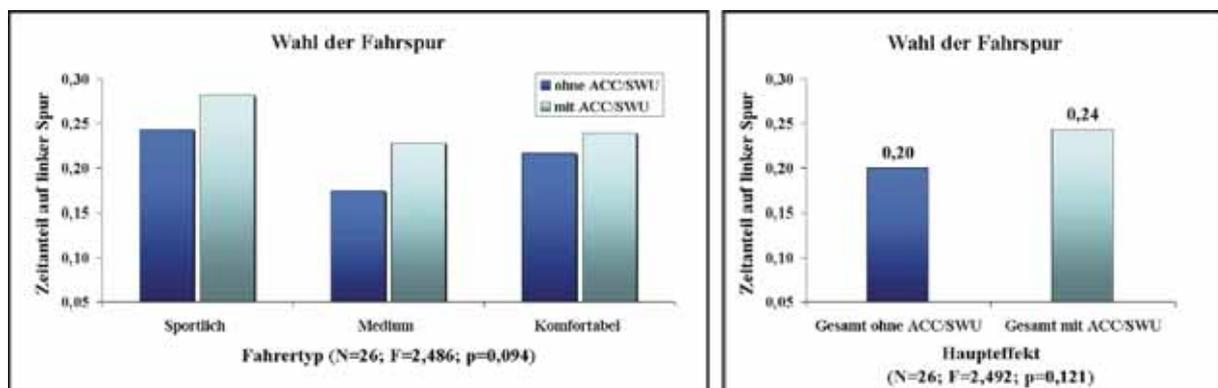


Bild 5.10: Veränderung der Fahrspurwahl

Das Ziel, systematische Abweichungen bei der Nutzungsdauer der linken Fahrspur zwischen Fahrten mit und ohne ACC/SWU durch die Spurwechselunterstützung auszugleichen, konnte erreicht werden. Durch den situationsabhängigen Reglereingriff des ACC/SWU-Systems wird

einerseits der zeitliche Beginn eines Spurwechsels wieder normalisiert (vgl. Kap. 5.6.1.3), was zu einer geringeren Fahrzeit auf der Zielspur führt. Andererseits wird durch die situationsadaptive Reglerreaktion auch der Wechsel nach rechts in schmalere Lücken attraktiver, da unnötige Bremsungen wirkungsvoll vermieden werden können, wenn anschließend ein weiterer Spurwechsel erfolgt. Die Hypothese Nr. 3, dass sich die Spurwahl zwischen der nicht-unterstützten Fahrt und der Fahrt mit dem situationsadaptiven, nutzerzentrierten ACC nicht unterscheidet, konnte bestätigt werden. Eine ausführliche Analyse der Verbesserungen des situationsadaptiven ACC/SWU-Systems im direkten Vergleich zum Serien-ACC wird in Kapitel 6 gegeben.

### 5.6.1.7 Bremsungen > 1,5m/s<sup>2</sup>

Bei der Messfahrt ohne ACC konnten durchschnittlich 12 manuelle Bremsungen festgestellt werden. Die leicht gestiegene Anzahl auf 14 erforderliche Bremsungen durch den Fahrer und das System während der ACC/SWU-Fahrt ist statistisch nicht signifikant. Systematische Unterschiede bezüglich des Fahrstils, wie noch in der Fahrstudie von 2005, zwischen komfortablen, normalen und sportlichen Fahrern konnten weder in der Baseline noch in der Messfahrt mit ACC bestätigt werden (vgl. Bild 5.11).

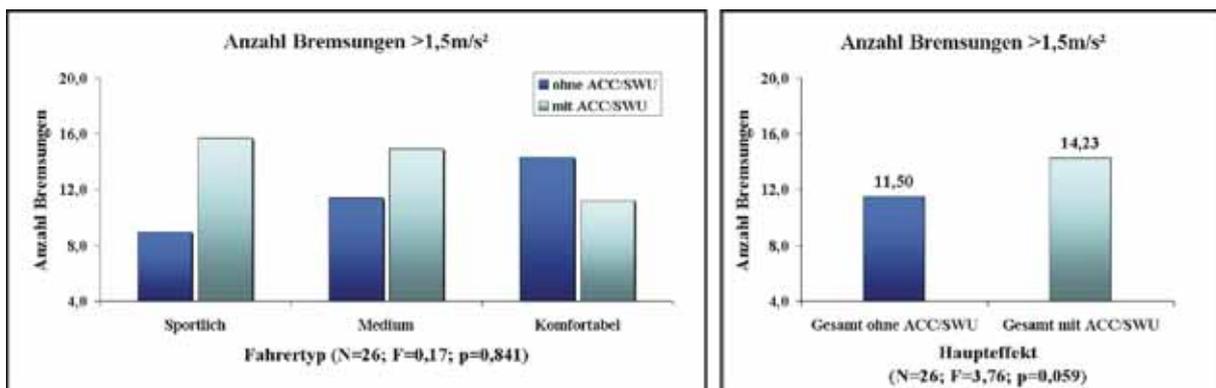


Bild 5.11: Veränderung des Bremsverhaltens

Dass keine systematischen Unterschiede mehr zwischen der Fahrt mit und ohne ACC/SWU bestehen, ist auf die verbesserte Antizipation des ACC/SWU-Systems in Spurwechselsituationen zurückzuführen und bestätigt die Hypothese Nr. 5. Die feststellbare Tendenz, dass weiterhin mehr Bremsengriffe mit ACC erforderlich sind, erklärt sich daraus, dass neben der Spurwechselsituation insbesondere bei Einschersituationen oder schlechter Objektdetektion hohe Verzögerungswerte zur Ausregelung der Situation erforderlich werden. Diese Situationen werden von der situationsadaptiven SWU-Funktion nicht erfasst. Um zukünftige ACC-Systeme auch in diesen Situationen verbessern zu können, müssen die Sensoren und Erkennungsalgorithmen weiterentwickelt werden.

### 5.6.1.8 Spurwechselklassen

Im Folgenden wird die Verteilung aller Spurwechsel nach den Spurwechselklassen, wie sie in Kap. 3.7.1.8 definiert sind, bezogen auf die Daten aus der Messfahrt 2006 mit und ohne ACC/SWU dargestellt. Die Ergebnisse sind in Bild 5.12 zu sehen.

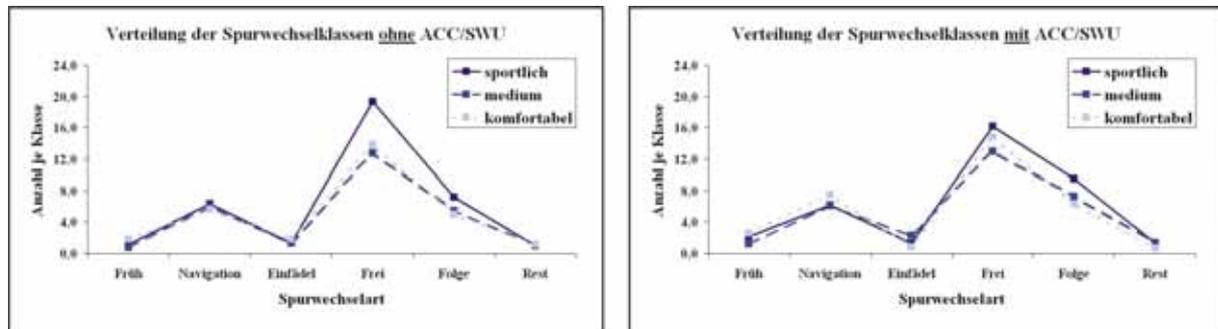


Bild 5.12: Spurwechselklassen mit und ohne ACC/SWU

Vergleichbar zu der Probandenstudie 2005 wurde auch 2006 zwischen der Messfahrt mit und ohne ACC/SWU ein systematischer Unterschied bei den frühen Spurwechseln festgestellt ( $N=26$ ;  $F=4,80$ ;  $p=0,034^*$ ). Wurden bei der Fahrt ohne ACC noch 1,12 frühe Spurwechsel vom Fahrer durchgeführt, steigt bei der ACC/SWU-Fahrt diese Anzahl nominell leicht auf 1,77. Hinsichtlich der Spurwechsel aus Navigation zeigen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen der Messfahrt mit und ohne ACC/SWU. Dies entspricht dem Erwartungswert, da bei beiden Fahrten die Fahrtroute für die Probanden identisch gehalten wurde. Analog verhält es sich bei den Spurwechseln aus Kooperation in Einfädelsituationen. Diese lagen mit durchschnittlich 1,73 (mit ACC/SWU) und 1,42 (ohne ACC) vergleichbar hoch. Systematische Unterschiede hinsichtlich der Fahrt mit oder ohne ACC/SWU oder auch bezüglich des Fahrstils konnten nicht festgestellt werden. Bei den Annäherungsspurwechseln liegt 2006 die gefundene durchschnittliche Anzahl mit ACC bei 14,15 und ohne ACC bei 14,54 auf gleichem Niveau. Ein signifikanter Haupteffekt wie in der Fahrstudie 2005 konnte nicht mehr festgestellt werden. Begründet werden können diese nahezu identischen Werte durch die situationsabhängigen Reglerreaktionen, die das Spurwechseln für den Fahrer deutlich erleichtern und damit einer Verlagerung des Spurwechselverhaltens in die Klassen früher Spurwechsel und Folgespurwechsel entgegenwirken. Dadurch dass ACC/SWU bei erkannten Spurwechselsituationen frühes Bremsen vermeidet, werden Spurwechsel wieder mit normalem Ausschere Abstand begonnen, was direkt zu einer Reduzierung der frühen Spurwechsel führt. Daneben führt diese Reduzierung der Bremsungen dazu, dass weniger Folgefahrtsituationen entstehen und Annäherungssituationen begünstigt werden, was direkt zu vergleichbar vielen Folge- und Annäherungsspurwechseln führt. Eine Angleichung zwischen der Fahrt mit und ohne ACC/SWU ist die Folge. Innerhalb der Stichprobe unterscheiden sich moderate Fahrer signifikant von sportlichen ( $N=26$ ;  $F=5,387$ ;  $p=0,008^*$ ). Die Unterschiede zeigen sich sowohl bei der Baseline-Fahrt, in der moderate Fahrer durchschnittlich 12,79 und sportliche Fahrer 19,33 Annäherungsspurwechsel durchführen, als auch in der Messfahrt mit ACC/SWU (sportliche Fahrer 16,17; moderate Fahrer 13,00); (Bonf.  $T=-4,86$ ;  $p=0,006$ ). Korrespondierend zu den Spurwechseln aus Annäherung erfolgt eine Angleichung der Anzahl der Spurwechsel aus Folgefahrt. Die gefundene Verteilung zwischen den beiden Fahrten ist

zwar weiterhin signifikant ( $N=26$ ;  $F=5,99$ ;  $p=0,018^*$ ), d.h. mit ACC/SWU werden mehr Folgespurwechsel durchgeführt, allerdings liegen die Ergebnisse mit 7,58 und 5,77 deutlich näher zusammen als noch in der Fahrstudie von 2005. Die Hypothese Nr. 6 konnte bestätigt werden. Auffällig ist der Anstieg dieses Spurwechseltyps im Vergleich zu 2005, der eventuell auf Unterschiede im Verkehrsaufkommen zurückzuführen ist. Innerhalb des Fahrstils unterscheiden sich nur sportliche Fahrer signifikant von komfortablen Fahrern ( $N=26$ ;  $F=3,87$ ;  $p=0,028$  mit Bonf.  $T=-2,67$ ;  $p=0,034$ ). Wie zu erwarten, besteht innerhalb der Gruppe der unmotivierten oder nichtklassifizierbaren Spurwechsel kein signifikanter Unterschied.

Zusammenfassend zeigt sich, dass deutlich weniger systematische Unterschiede zwischen den Fahrten mit und ohne ACC/SWU bestehen als noch 2005, dass also durch das vernetzte, nutzerzentrierte ACC/SWU eine Angleichung des Fahrverhaltens hin zum normalen Fahren ohne ACC erfolgt ist. In vielen Merkmalen existieren entsprechend der Erwartungen gar keine signifikanten Unterschiede im Fahrverhalten mehr, in einigen verbleibenden Merkmalen fallen die Unterschiede quantitativ deutlich geringer aus. Inwieweit die Veränderungen real auf die verbesserte ACC/SWU-Funktionalität und nicht auf abweichende Rahmenbedingungen, wie die Zusammensetzung der Probandengruppe, oder auf äußere Einflüsse, wie die Verkehrsdichte, zurückzuführen sind, wird in Kap. 6 ausführlich analysiert.

## 5.7 Korrelation von Messdaten und Fragebogen

- Vergleichbar zum Fahrversuch 2005 zeigt sich, dass Probanden, die ihre Überholhäufigkeit mit ACC/SWU als herabgesetzt empfinden, in der Fahrt ohne ACC/SWU einen geringeren Ausscherabstand wählen als in der Fahrt mit ACC/SWU (Korr. Spearman;  $r=0,464$ ;  $p=0,020^*$ ;  $N=25$ ). D.h. trotz der Verbesserungen des Annäherungsverhaltens durch das situationsadaptive ACC/SWU besteht hier noch eine Korrelation.
- Weiterhin bestätigt sich, dass die Probanden, die angeben mit dem Gaspedal zu übertreten, dieses nach den Messdaten auch tun (Korr. Spearman:  $r=0,508$ ;  $p=0,008^*$ ;  $N=26$ ).
- Die in 2005 verwendete Referenzsituation zu erschwertem Überholen, die Naheinscherersituation, wurde erneut von einer großen Zahl von Fahrern bemerkt und als kritisch bewertet. Fahrer, die diese Situation als störend bewerteten, deaktivierten ACC/SWU häufiger per Bremsengriff als andere Fahrer (Korr. Spearman;  $r=0,441$ ;  $p=0,027^*$ ;  $N=25$ ).
- Die in der Fahrstudie von 2005, noch signifikante Korrelation, dass das als störend empfundene, erschwerte Überholen insbesondere von Fahrern wahrgenommen wurde, die viele Spurwechsel durchführen, konnte im Fahrversuch 2006 nicht mehr bestätigt werden.

- Durch den deutlichen Rückgang früher Spurwechsel und die Angleichung der Gesamtzahl der Spurwechsel durch das situationsadaptive ACC/SWU konnte die 2005 noch signifikante Korrelation von frühen Spurwechseln mit der Gesamtzahl der Spurwechsel im Fahrversuch mit ACC/SWU 2006 nicht mehr festgestellt werden.
- Auch die signifikante Korrelation, dass Fahrer, die ihr Fahrverhalten und ihr Überholverhalten im Fragebogen als nicht normal bewerten, in den Messdaten eine erhöhte Anzahl von starken Bremsungen aufweisen, konnte nicht mehr bestätigt werden.
- Durch die Erweiterung des Fragebogens um eine Frage zur direkten Akzeptanz der Spurwechselunterstützungsfunktion konnte folgende Korrelation festgestellt werden: Fahrer, die die SWU als positiv bewerten, haben eine geringe Differenz zwischen ihrem Ausscherabstand mit und ohne ACC/SWU (Korr. Spearman;  $r=0,623$ ;  $p=0,001^*$ ;  $N=26$ ). Dies weist darauf hin, dass diese Fahrer die situationsadaptiven Eingriffe des ACC/SWU-Systems in ihr normales Fahrverhalten integriert haben.

## **6 Unterschiede im Fahrverhalten zwischen beiden Fahrversuchen**

In diesem Kapitel werden Unterschiede zwischen den beiden Fahrversuchen von 2005 und 2006 herausgearbeitet. Im ersten Teil wird mittels objektiver Merkmale überprüft, ob sich die beiden Fahrstudien hinsichtlich der Merkmale der Probanden unterscheiden und ob eine Vergleichbarkeit der beiden Messfahrten ohne ACC uneingeschränkt gegeben ist. Im zweiten Teil werden dann die Ergebnisse der beiden Fragebögen hinsichtlich signifikanter Unterschiede analysiert. Im dritten Teil der Analyse erfolgt eine Gegenüberstellung der Merkmale aus den Messdaten. In den Fällen, in denen die Baseline-Messungen vergleichbar sind, können die Merkmale unmittelbar zwischen den Fahrstudien verglichen werden. In den wenigen Fällen, in denen systematische Abweichungen zwischen den Baseline-Messfahrten bestehen, werden die relativen Änderungen bezogen auf die Baseline gegenübergestellt. Abgeschlossen wird das Kapitel durch eine objektive Leistungsanalyse der Funktion Spurwechselunterstützung unter Gesichtspunkten wie z.B. der Zahl der Fehlauflösungen oder fehlinterpretierter Situationen und berechtigter situationsadaptiver Eingriffe.

### **6.1 Vergleichbarkeit der beiden Fahrstudien**

Die beiden Stichproben unterscheiden sich hinsichtlich Geschlecht und Alter und deren Fahrzeugnutzung auf der Autobahn nicht signifikant voneinander. Auch bei ihrer, mit dem Fragebogen erhobenen, Bewertung der Trainingsdauer und des Systemvertrauens sind keine signifikanten Unterschiede feststellbar. Ihre Einschätzungen hinsichtlich Verhaltensänderungen (Normalverhalten, Überholverhalten, Auffahrverhalten, Abfahrverhalten) zeigen keine signifikanten Abweichungen.

Dass in diesen subjektiven Fragebogendaten der Probanden keine systematischen Abweichungen in den Ergebnissen feststellbar sind, beweist, dass eine Replikation des Versuchs in Bezug auf die Probandenauswahl und die Mess- und Trainingsfahrt gelungen ist.

Im Folgenden wird die Messfahrt ohne ACC aus der Studie 2005 mit der Messfahrt ohne ACC/SWU aus der Studie 2006 miteinander verglichen. In den Merkmalen Bremsverhalten, gesamte Fahrzeit, Zahl der Spurwechsel mittlere Spurwechseldauer, durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit sowie der mittleren Zeitlücke konnten keine systematischen Unterschiede zwischen den beiden Messfahrten ohne ACC bzw. ohne ACC/SWU festgestellt werden. Dies weist auf eine Vergleichbarkeit der Rahmenbedingungen der Fahrstudien hin.

Bei dem Merkmal Spurwahl (vgl. Bild 6.1) zeigt sich hingegen, dass zwischen der Fahrt ohne ACC aus der ersten und der Fahrt ohne ACC/SWU aus der zweiten Fahrstudie systematische Unterschiede bestehen. Lag der Zeitanteil auf der linken Spur in den Fahrten ohne ACC 2005 noch bei durchschnittlich 12,2%, wurde 2006 ein Zeitanteil von 20,0% auf der linken Spur ermittelt ( $N=52$ ;  $F=61,73$ ;  $p=0,000^*$ ).

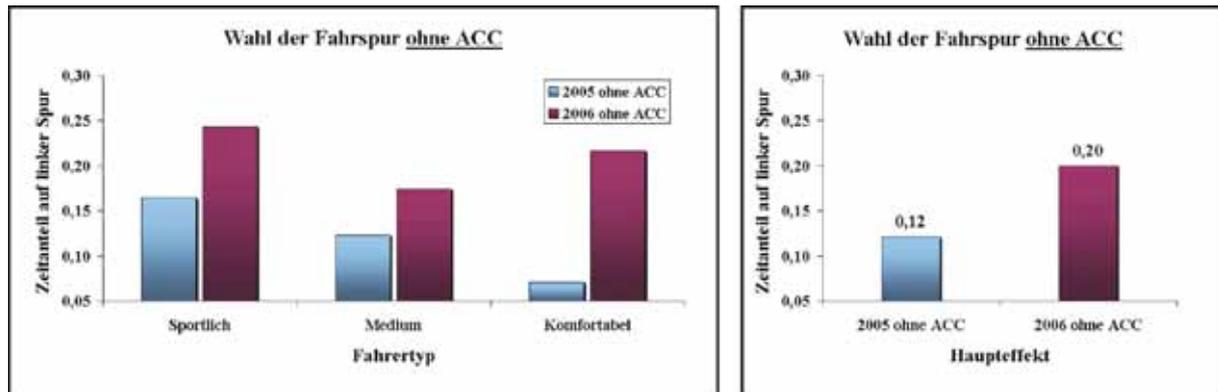


Bild 6.1: Vergleich der Spurwahl 2005 und 2006

Dass diese Abweichungen auf Fehler in der Auswertung zurückführbar sind, kann aufgrund des identischen Auswertungsprozesses ausgeschlossen werden. Deshalb kommen entweder veränderte Verkehrsverhältnisse oder persönliche Vorlieben, wie eine Präferenzspur der Probanden, in Frage. Letzterer Faktor kann nur geschätzt werden. Gegen veränderte Verkehrsverhältnisse spricht hingegen, dass sowohl die Durchsicht des Videomaterials dies nicht bestätigt als auch, dass sich Merkmale wie die durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit oder die Fahrzeit nicht systematisch zwischen den Fahrstudien unterscheiden. Für die Auswertung der Unterschiede zwischen dem Fahrverhalten mit dem Serien-ACC und dem vernetzten, situationsadaptiven ACC/SWU beim Merkmal Spurwahl muss das unterschiedliche Niveau der Baseline-Fahrt 2005 und 2006 bei der Interpretation berücksichtigt werden.

Neben der Spurwahl unterscheidet sich auch die Differenzgeschwindigkeit beim Ausscheren in beiden Fahrstudien während der Baseline-Fahrten ( $N=52$ ;  $F=6,62$ ;  $p=0,012^*$ ). Diese lag 2005 im Durchschnitt bei 21,3 km/h und 2006 bei 24,9 km/h. Wieder kommen intraindividuelle Unterschiede in der Probandengruppe und die Verkehrsdichte als beeinflussende Faktoren in Frage. Wie bei den Überlegungen zur Spurwahl ist ein Einfluss der Verkehrsdichte unwahrscheinlich. Da es sich bei der Differenzgeschwindigkeit beim Ausscheren um eine individuelle Schwelle für jeden Fahrer handelt (vgl. Kap. 4.3.3.1.2), muss dieser Effekt den verschiedenen Stichproben zugesprochen werden.

Innerhalb des Spurwechselverhaltens konnte eine abweichende Verteilung der Spurwechsel nach Spurwechselklassen in der Baseline-Fahrt festgestellt werden (siehe Bild 6.2). Betroffen davon sind die frühen Spurwechsel und Spurwechsel aus Folgefahrt ( $N=52$ ,  $F=4,28$ ;  $p=0,041^*$  bzw.  $N=52$ ;  $F=27,10$ ;  $p=0,000^*$ ). Alle anderen Spurwechselklassen, wie Navigationsspurwechsel, Kooperationsspurwechsel aus Einfädelhilfe und normale Annäherungsspurwechsel sowie unmotivierter Spurwechsel, unterscheiden sich nicht systematisch in den beiden Fahrstudien.

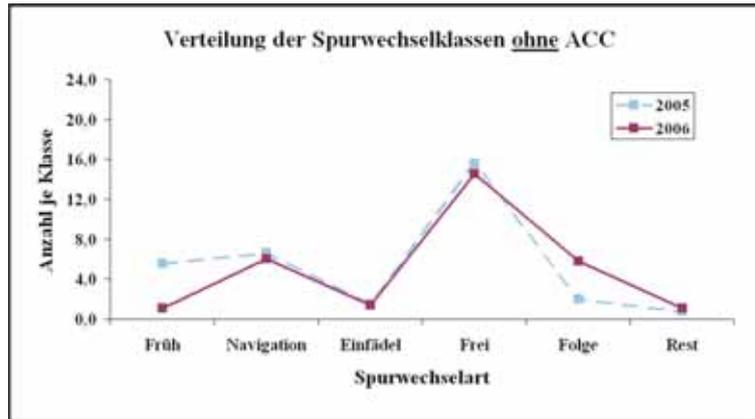


Bild 6.2: Vergleich der Spurwechselverteilung 2005 und 2006

Die Veränderung der Ergebnisse bei den frühen Spurwechseln (Kl. 1) kann verschiedene Gründe haben. Da die Klassifikation direkt abhängig ist von der aktuellen Sichtweite des Radarsensors, können sowohl Umgebungseinflüsse als auch die Kalibrierung des Sensors beeinflussend wirken. Da es sich bei der Klassifikation um eine manuelle Zuordnung gehandelt hat, sind außerdem Abweichungen im Zuordnungsprozess möglich. Um von vorne herein diesen subjektiven Einfluss durch die manuelle Klassifikation minimal zu halten, wurden die identischen Zuordnungskriterien, das identische Vorgehen und dieselbe Person für die Klassifikation eingesetzt. Neben diesen technischen oder prozesstechnischen Einflüssen können auch fahrerspezifische Einflüsse sowie die umgebende Verkehrssituation und -dichte eine Rolle spielen. Um den Einfluss der Verkehrssituation, d.h. umgebende Fahrzeuge, als Einflussfaktor während eines Spurwechsel ausschließen zu können, wurden alle Spurwechsel hinsichtlich der Klassen Lead, Lag, Free, und Gap (vgl. [Sparmann 1978]) analysiert. Die gefundenen Ergebnisse unterscheiden sich nicht systematisch voneinander und sind in Tabelle 6.1 zusammengefasst.

	Fahrversuch	
	2005	2006
Free	42,9%	41,5%
Gap	10,1%	12,1%
Lag	12,3%	7,5%
Lead	25,7%	29,7%
unklassifiziert	9,0%	9,2%

Tabelle 6.1: Verteilung der Spurwechselarten

Als Begründung für die Abweichungen verbleiben daher erneut nur Unterschiede zwischen den Probandengruppen.

Zusammenfassend zeigt sich, dass insgesamt eine Vergleichbarkeit der beiden Fahrstudien gegeben ist. In den meisten relevanten Kriterien stimmen die Baseline-Fahrten überein und es konnten keine systematischen Änderungen festgestellt werden. Abweichungen wurden nur bei der Verteilung der Spurwechselklassen, der Fahrspurwahl und der Differenzgeschwindigkeit beim Ausscheren festgestellt. Die gefundenen Abweichungen sind hierbei auf die geringere

Möglichkeit zurückzuführen, die Umgebungsbedingungen bei Realfahrversuchen im Straßenverkehr zu kontrollieren (vgl. Kap. 3.2). Für den Vergleich und die Bewertung der Fahrt mit ACC/SWU (2006) gegenüber der Fahrt mit dem Serien-ACC (2005) müssen die Abweichungen der Baseline-Fahrt mit berücksichtigt werden. Spezifische Maßnahmen, wie z.B. eine auf die Baseline bezogene, relative Betrachtung der Fahrerverhaltensänderungen, werden bei den betroffenen Kriterien in Kap. 6.3 erklärt und eingesetzt.

## 6.2 Unterschiede in der subjektiven Wahrnehmung

Die deskriptiven statistischen Auswertungen des Fragebogens sind in Kap 3.6 (Probandenstudie 2005) und in Kap. 5.5 (Probandenstudie 2006) zu finden. Zusätzlich dazu wurden in der Analyse von 2006 die Ergebnisse von 2005 häufig als Referenz angeführt. Im Folgenden werden die in den Fragebögen signifikant abweichenden Ergebnisse dargestellt. Betrachtet werden die Änderungen, die direkt auf die Funktionsverbesserung des ACC durch die Vernetzung mit den anderen Fahrerassistenzsystemen zurückzuführen sind.

Der Vergleich der Vorhersehbarkeit der ACC- bzw. ACC/SWU-Reaktionen (vgl. Bild 6.3) zeigt, dass die Teilnehmer der zweiten Studie eine signifikant höhere Nutzertransparenz äußern und die Reaktionen des situationsadaptiven ACC/SWU-Systems im Vergleich zum Serien-ACC als verständlicher bewertet werden. Dieses Ergebnis kann direkt auf die nutzerzentrierte, situationsadaptive Systemausprägung zurückgeführt werden.

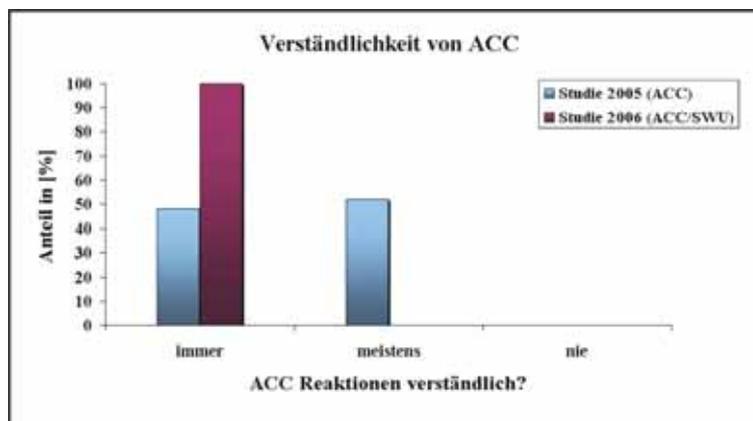


Bild 6.3: Vergleich der Nutzertransparenz

Bei der kognitiven Belastung durch ACC wurden wie erwartet keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Fahrversuchen festgestellt. Auch das Abstands- und Geschwindigkeitsverhalten der Probanden zwischen den beiden Fahrstudien unterscheidet sich in der Selbsteinschätzung nicht systematisch.

Dass sich in der subjektiven Wahrnehmung weder die Überholhäufigkeit noch der Überholzeitpunkt zwischen den beiden Fahrstudien signifikant verändert haben, widerspricht den Erwartungswerten. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass den Fahrern für diese sehr spezifischen Fragen die nötige objektive Beurteilungskompetenz fehlt. Zum einen müssen die Probanden geringfügige Veränderungen bewusst wahrnehmen, zum anderen wurden sie nicht angewiesen, auf diese doch sehr spezifischen Merkmale ihres Fahrverhaltens während der

Messfahrt zu achten. Um an dieser Stelle dennoch eine gesicherte Aussage treffen zu können, sei auf die Analyse der Messdaten zwischen den Fahrten mit situationsadaptivem ACC/SWU (2006) und Serien-ACC (2005) in Kap. 6.3 verwiesen. Ein eindeutiger, systematischer Unterschied zwischen den beiden Fahrversuchen kann hingegen zahlenmäßig beim Übertreten per Gaspedal festgestellt werden (siehe Bild 6.4).

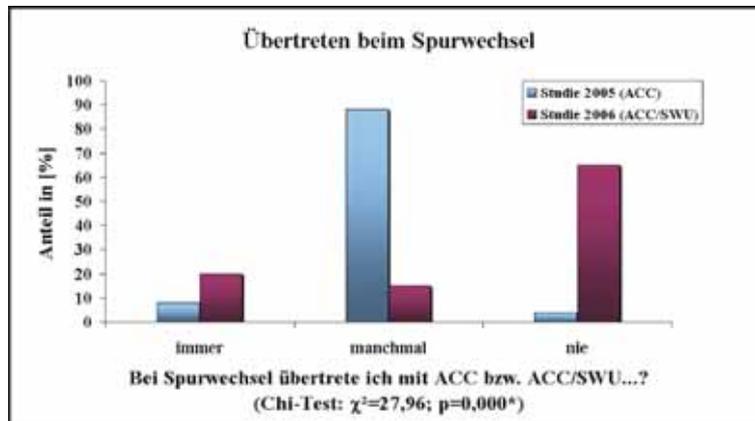


Bild 6.4: Vergleich des Übertretens per Gaspedal

Es wird deutlich, dass Fahrer mit situationsadaptivem ACC/SWU seltener im Fragebogen angeben, in Spurwechselsituationen das System zu übertreten. Der Erwartungswert für diese Frage konnte somit bestätigt werden. Zurückzuführen ist diese reduzierte Zahl darauf, dass in weniger Situationen erschwertes Überholen aufgetreten ist.

Komplizierter ist hingegen die Erklärung dafür, dass sich auch das Abfahrverhalten (Deaktivieren des Systems siehe Bild 6.5) zwar geringfügig, aber signifikant zwischen den beiden unabhängigen Fahrversuchen unterscheidet.

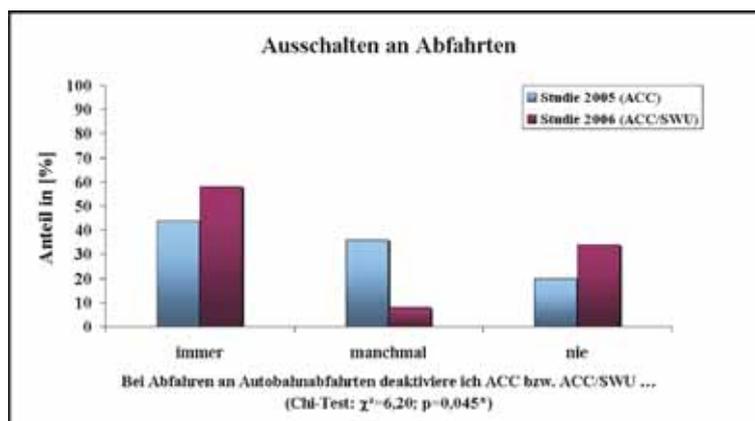


Bild 6.5: Vergleich des Abschaltverhaltens beim Abfahren

Fahrer aus der Studie von 2005 schalten zuverlässiger das System vor dem Verlassen der Autobahn aus als Probanden aus der Fahrstudie von 2006. Da diese Situation nicht funktional durch situationsadaptive Eingriffe verbessert worden ist, muss diese Abweichung im Fahrerverhalten auf Abweichungen innerhalb des ACC-Trainings und die damit verbundenen Lernprozesse zurückgeführt werden.

Bei der Bewertung der Sensor- oder Funktionsgrenzen des ACC- bzw. ACC/SWU-Systems lassen sich für keine Einzelsituation signifikante Unterschiede zwischen den beiden Probandenstudien nachweisen. Alle derartigen Situationen wurden in der subjektiven Einschätzung durch die Probanden als vergleichbar wahrgenommen. Dies widerspricht dem Erwartungswert, dass das erschwerte Überholen signifikant als weniger störend empfunden werden müsste. Eine Begründung hierfür könnte sein, dass sich zwar die Anzahl der störenden Situationen quantitativ reduziert hat, dass aber die verbleibenden erschwerten Überholsituationen durch zu frühes Bremsen des ACC- bzw. ACC/SWU-Systems von den Probanden weiterhin als störend empfunden wurden. Mit der berechtigten Annahme, dass im Fahrversuch 2005 alle Annäherungsspurwechsel durch frühes Bremsen des ACC-Systems erschwert wurden, ermöglicht die Auswertung der Leistungsbewertung der SWU-Funktion in Kapitel 6.4 eine eindeutige Aussage, wie viele Überholvorgänge durch den situationsadaptiven Eingriff des ACC/SWU-Systems verbessert werden konnten.

### 6.3 Rückbildung von Fahrerverhaltensänderungen

In Kap. 5 konnte gezeigt werden, dass die Unterschiede zwischen der Fahrt mit ACC/SWU und der Baseline-Fahrt geringer ausgefallen sind als noch im Fahrversuch von 2005. Der situationsadaptive Reglereingriff ermöglicht dem Fahrer, sein normales Fahrverhalten auch mit ACC/SWU häufiger zu zeigen. In diesem Kapitel werden nun die Messdaten mit ACC aus der Fahrstudie 2005 und mit den Ergebnissen der Messdaten des situationsadaptiven, vernetzten ACC/SWU von 2006 verglichen, mit dem Ziel, den jeweiligen Einfluss auf das Fahrerverhalten zu analysieren. Hierzu werden die signifikanten Unterschiede dieser beiden Messfahrten zueinander betrachtet.

Vergleicht man, wie oft das System während der beiden ACC-Fahrten per Gaspedal übertreten wurde, so zeigt sich signifikant, dass die Anzahl in der Fahrt mit ACC/SWU deutlich zurückgeht. Nutzen in der Fahrstudie 2005 die Fahrer noch durchschnittlich 13,6 mal die Möglichkeit, das ACC per Gaspedal zu übertreten, reduziert sich diese Anzahl mit dem situationsadaptiven, vernetzten ACC/SWU auf durchschnittlich 8,15 (vgl. Bild 6.6).

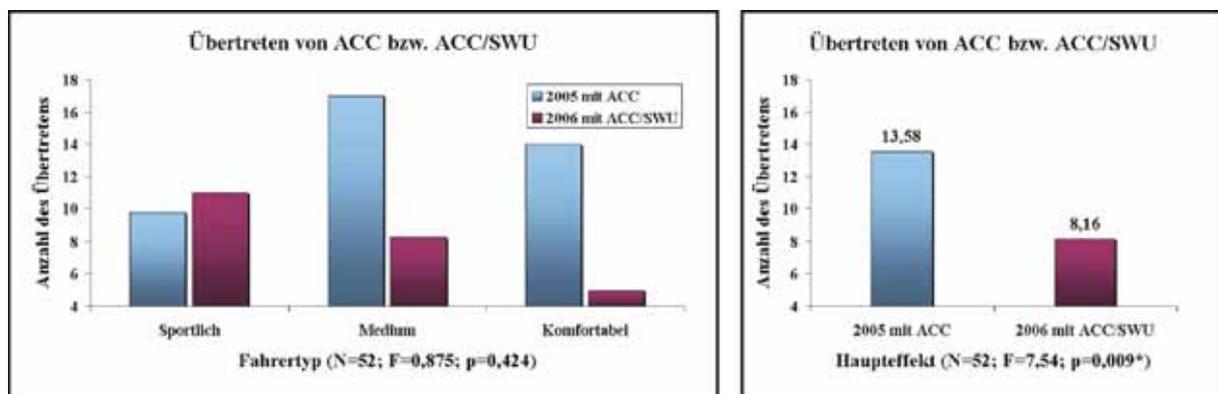


Bild 6.6: Vergleich des Verhaltens beim Übertreten per Gaspedal 2005 und 2006

Zurückzuführen ist dies auf die angepassten Reglerreaktionen des verbesserten ACC/SWU-Systems, die dem natürlichen Fahrerverhalten mehr entsprechen. Überflüssiges Bremsen des

Systems in Annäherungssituationen mit Spurwechselfähigkeit, was häufig zu Übertreten per Gaspedal führt, konnte wirkungsvoll vermieden werden.

Ferner zeigt sich, dass die Ausscherzeitlücke, respektive der Ausscherabstand, mit dem vernetzten, situationsadaptiven ACC/SWU systematisch geringer ausfällt als mit der Serien-ACC-Ausprägung (N=52; F=4,01; p=0,048\*). Die Ausscherzeitlücken der beiden Baseline-Messfahrten liegen auf gleichem Niveau, so dass auch die beiden Fahrten mit ACC unmittelbar miteinander verglichen werden können. Lag der Median der Zeitlücke beim Serien-ACC noch bei 2,62 s, so reduziert sich der Median der Zeitlücke zu Beginn des Spurwechsels mit ACC/SWU im Fahrversuch 2006 signifikant auf 1,92 s (vgl. Bild 6.7).

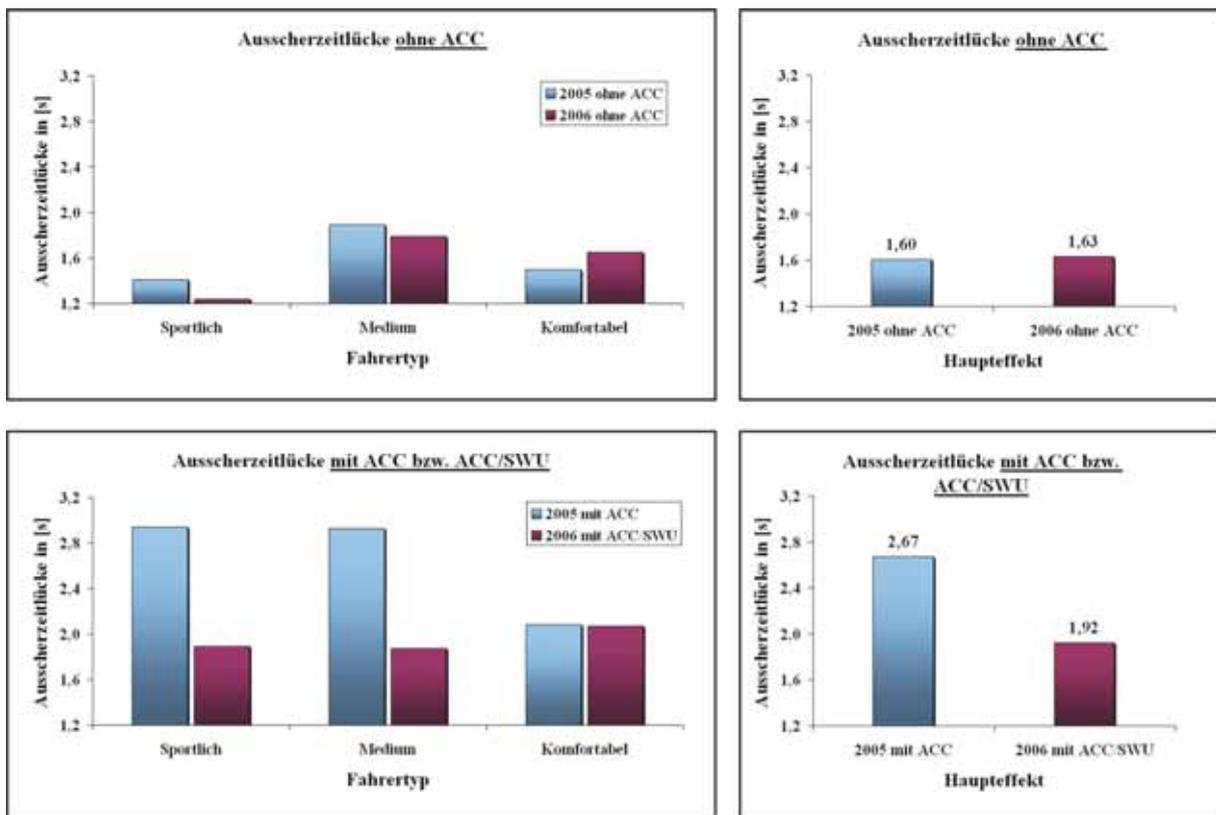


Bild 6.7: Vergleich der Ausscherzeitlücke 2005 und 2006

Bei einer Geschwindigkeit von 130 km/h entspricht dies einer Reduktion des Ausscherabstandes um mehr als 25 m. Die so entstandene Angleichung hin zum normalen Fahren resultiert direkt aus der situationsadaptiven, nutzerzentrierten Regelstrategie. Fahrerhaltensänderungen im Ausscherverhalten fallen somit deutlich geringer aus.

Neben der Ausscherzeitlücke steigt in der Fahrstudie mit ACC/SWU 2006 auch die Ausscherdifferenzgeschwindigkeit zum Vorderfahrzeug zu Spurwechselbeginn signifikant an (N=52; F=6,62; p=0,012\*). Bei der Interpretation muss darauf geachtet werden, dass in der Varianzanalyse für dieses Merkmal ein geringer, aber systematischer Unterschied zwischen den beiden Baseline-Fahrten besteht. Aus diesem Grund müssen hier sowohl die beiden Baseline-Fahrten zueinander als auch die Fahrten mit ACC bzw. ACC/SWU relativ zur jeweiligen Baseline-Fahrt interpretiert werden (siehe Bild 6.8).

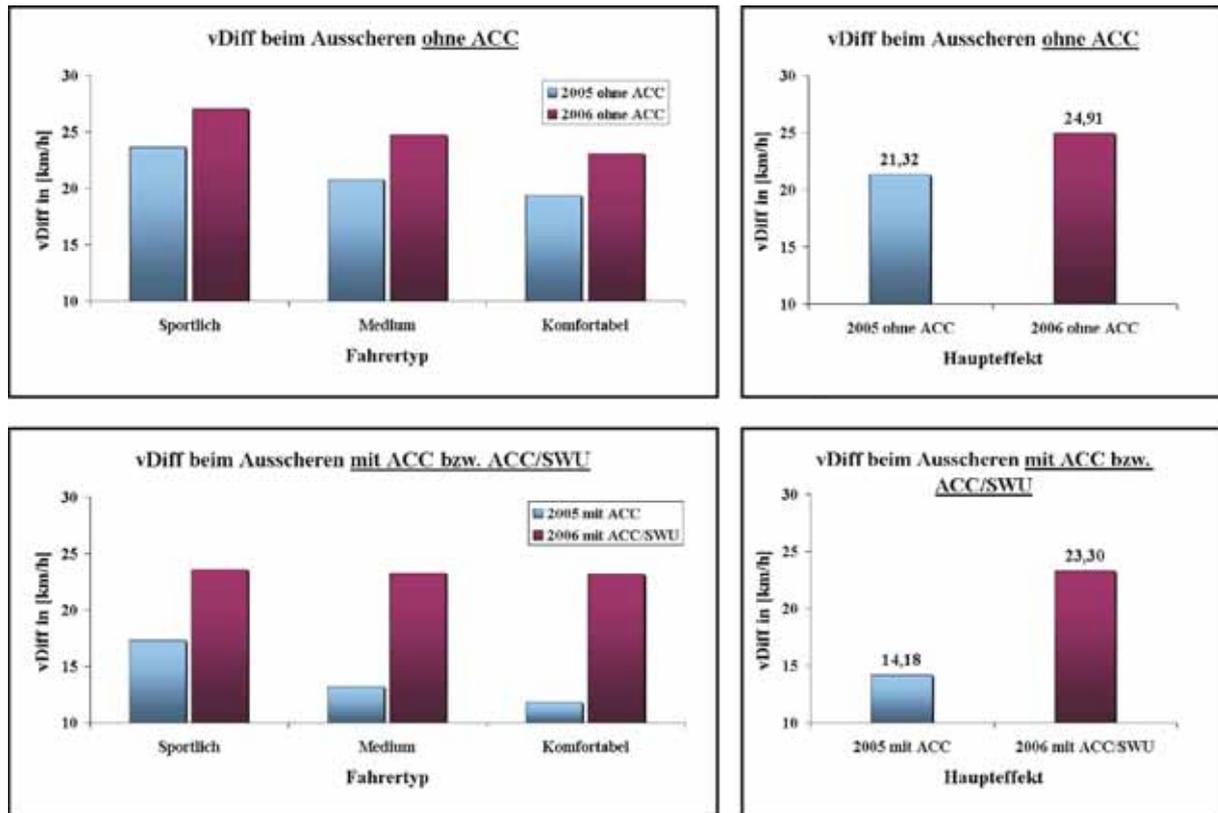


Bild 6.8: Vergleich der Ausscherdifferenzgeschwindigkeit 2005 und 2006

Dass bei der Fahrt mit situationsadaptivem, vernetztem ACC/SWU die Differenz deutlich geringer ausfällt, ist durch die Reduzierung unnötiger Bremsungen während der Annäherung auf ein Vorderfahrzeug zu erklären. In dieser Phase wird durch das Serien-ACC über die frühen Bremsengriffe die Relativgeschwindigkeit in der Annäherungsphase abgebaut. Durch die verbesserte Situationsrepräsentation auf Basis der vernetzten Fahrerassistenzsysteme konnte das Verhalten von ACC/SWU an dieser Funktionsgrenze wirkungsvoll verbessert werden.

Der Erwartungswert, dass sich ein signifikanter Unterschied auch in der Zahl stärkerer Bremsungen größer  $1,5 \text{ m/s}^2$  zeigt, konnte nicht bestätigt werden. Es ist zu vermuten, dass durch die situationsspezifischen Eingriffe des ACC/SWU-Systems insbesondere leichte Komfortbremsungen reduziert werden, dass aber die Ursache für stärkere Bremsungen in dem nicht ausreichenden Sichtbereich der Sensoren in Naheinscherersituationen und schnellen Annäherungen liegt. Da diese Einflussfaktoren auf die Anzahl der Bremsungen in beiden Studien identisch waren, konnten keine systematischen Unterschiede im Bremsverhalten zwischen dem Serien-ACC und den Fahrten mit ACC/SWU ermittelt werden.

Auch innerhalb des Spurwechselverhaltens zeigt sich, dass ACC/SWU im Vergleich zum Serien-ACC das natürliche Fahrverhalten besser widerspiegelt. Bild 6.9 zeigt die Verteilung der verschiedenen Spurwechselklassen für die Probandenstudie von 2005 und von 2006. Dargestellt ist die Differenz zwischen der ACC- bzw. ACC/SWU-Messfahrt und der zugehörigen Baseline-Fahrt. Die Nulllinie repräsentiert also für beide Graphen die jeweilige Baseline-Fahrt.

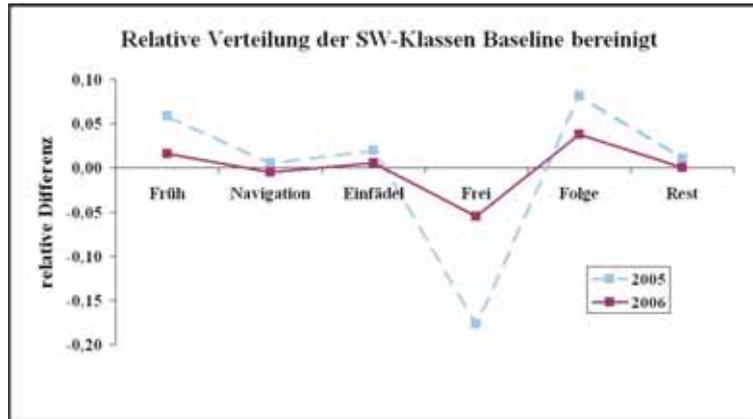


Bild 6.9: Vergleich der Spurwechselklassen 2005 und 2006

Erneut ist hier die Betrachtung von Differenzen erforderlich, da bei den Spurwechselklassen früher und Folge-Spurwechsel systematische Unterschiede zwischen den Baseline-Fahrten bestehen (vgl. Kap. 6.1). Um eine einheitliche Betrachtung aller Spurwechselklassen möglich zu machen, wurden auch alle anderen Spurwechselklassen über Differenzen zur jeweiligen Baseline analysiert. Wie erwartet, unterscheiden sich die Spurwechsel aus Navigation, Spurwechsel zum Zweck der Einfädelhilfe und unmotivierter Spurwechsel zwischen ACC und dem situationsadaptiven ACC/SWU nicht systematisch. Bei frühen Spurwechseln zeigt sich, dass die Spurwechselunterstützung zu einer Normalisierung des Fahrverhaltens führt, d.h. die Probanden beginnen ihre Spurwechsel zu vergleichbaren Zeitpunkten wie in der Fahrt ohne ACC ( $N=52$ ;  $F=4,28$ ;  $p=0,041^*$ ). Die Ergebnisse der Ausscherzeitlücke konnten hiermit erneut bestätigt werden. Verantwortlich hierfür sind Lerneffekte der Probanden, dass durch situationsangepasste Bremsreaktionen normale Annäherungen möglich werden und somit Verhaltensadaptationen, wie sie noch bei der Fahrt mit dem Serien-ACC festgestellt werden konnten, nicht mehr erforderlich sind. Noch deutlicher zeigt sich der Effekt bei den flüssigen Spurwechseln aus Annäherung. Hier konnte eine signifikante Verbesserung, also eine Reduzierung der Differenz zwischen der jeweiligen Baseline-Fahrt und der Fahrt mit ACC bzw. ACC/SWU, von 17,6% auf 5,4% erreicht werden ( $N=52$ ;  $F=4,02$ ;  $p=0,048^*$ ). Eine Verlagerung des Spurwechselverhaltens hin zu Folgespurwechseln, wie es noch 2005 festgestellt werden konnte, ist mit dem vernetzten, situationsadaptiven ACC/SWU-System nicht mehr zu beobachten. Im Gegenteil zeigt sich, dass das Normalverhalten, hier repräsentiert über die Nulllinie, durch ACC mit Spurwechselunterstützung besser abgebildet wird ( $N=52$ ;  $F=27,10$ ;  $p=0,000^*$ ). Das situationsadaptive ACC/SWU führt hier dazu, dass signifikant weniger Folgespurwechsel durchgeführt werden und dass sich die Zahl zurück zum Normalwert der Baseline-Fahrt entwickelt.

## 6.4 Leistungsbewertung des ACC/SWU-Systems

Konnten über die Fragebogenauswertung der subjektive Eindruck und aus der Messdatenauswertung die Rückentwicklung der Fahrerhaltensänderungen durch die SWU gezeigt werden, fehlt noch ein Bewertungsverfahren, das die Leistungsfähigkeit des situationsadaptiven ACC/SWU-Systems objektiv analysiert. Um diese Lücke zu schließen,

wurde eine Leistungsbewertungsfunktion entwickelt. Unter Leistungsbewertung soll im Folgenden eine Methode verstanden werden, die den Vergleich zwischen Soll- und Ist-Zustand durchführt, um die Stärken und Schwächen des situationsadaptiven ACC/SWU-Systems aufzudecken.

Zurückgegriffen wird hierbei auf die Messdaten mit ACC/SWU der Fahrstudie 2006. Während dieses Fahrversuchs wurden alle relevanten, internen Berechnungsgrößen der Funktionsmodule (vgl. Kap. 4.3) auf einem separaten SWU-CAN-Bus für alle Probanden aufgezeichnet. Somit liegen für alle Fahrsituationen, und speziell für die Spurwechselsituationen, die entsprechenden Reaktionen der Funktion SWU vor. Auf Basis dieser Daten wurden dann die Funktionalität und Stabilität der einzelnen Module der Funktion untersucht. Außerdem wurden alle in den Messdaten ermittelten Spurwechsel aus Annäherung und Einfädelsituation, bezogen auf Fehlauflösungen, unterlassene Auslösungen sowie Stabilität der eingesetzten Signale, differenziert analysiert. Die Auswerterroutine zur Analyse objektiver Verhaltensänderungen (vgl. Kap. 3.7) wurde dafür um eine Analysefunktion zur Bewertung der SWU-Funktion erweitert. Hierfür wurde eine Resampling-Funktion entwickelt, die die internen SWU-Daten zeitlich mit den Ergebnissen der Analysefunktion aus Kap. 3.7 verknüpft. Aus der Auswertung lag die Information vor, wann ein Spurwechsel stattgefunden hat und welcher Klasse er zugeordnet wurde (vgl. Kap. 3.7.1.8). Bezogen auf diese Zeitpunkte wurden dann die Reaktionen der Funktionsmodule der SWU-Funktion in unmittelbarer Nähe zu den Spurwechseln analysiert. So konnte eine Aussage darüber getroffen werden, wann und wie häufig welche Reaktionen der SWU-Funktion aufgetreten sind. Außerdem konnten detailliert die einzelnen Kriterien, die für eine aktive SWU-Funktion erfüllt sein müssen, hinsichtlich ihres Auslösezeitpunkts, ihrer Signalstabilität und ihrer Wirksamkeit analysiert werden.

Daneben ermöglicht die Auswertung aller SWU-Reaktionen, bei denen im Anschluss kein Spurwechsel erfolgt ist, die Bewertung, wie viele Fehlauflösungen und in welchen Situationen diese aufgetreten sind. Erneut wurde diese Analyse detailliert auf allen Ebenen der SWU-Funktionsmodule durchgeführt.

Im Folgenden sind in Form von Frage und Antwort (Frage 1-6) die wichtigsten Ergebnisse der Leistungsbewertungsfunktion zusammengestellt. Alle Ergebnisse resultieren aus der oben genannten Leistungsbewertungsfunktion.

Frage 1:

„Mit welchen Maßnahmen kann das Gesamtsystem vernetztes, situationsadaptives ACC/SWU noch verbessert werden?“

Ein Ergebnis der Leistungsanalyse ist, dass die SWU-Funktion in 67% aller erforderlichen Situationen den Fahrer wirkungsvoll unterstützt hat. Nimmt man zu diesen Situationen noch jene hinzu, in denen eine unterlassene situationsadaptive Handlung keine Auswirkung auf den Bremsengriff hat, so erhöht sich dieser Wert auf 75%. Dass die verbleibenden 25% der Fälle nicht unterstützt wurden, hat verschiedene Ursachen. Zum einen spielt die

Sensorperformance, insbesondere der rückwärtigen Sensorik, und damit die ungenaue Situationsrepräsentation im Rückraum eine große Rolle. Zum anderen können kurzfristige Instabilitäten in der Berechnung der Spurwechselmotivation, wie oben beschrieben, die Funktionsfähigkeit beeinflussen. Besonders bei Annäherungssituationen mit niedrigen Differenzgeschwindigkeiten besteht hier noch Optimierungspotential durch neue Ansätze wie Fuzzy-Logik (vgl. Kap. 7.1).

Frage 2:

„Deckt das momentane Motivationsmodul alle erforderlichen Verkehrssituationen ab?“

Hier liefert die Leistungsbewertung als Ergebnis, dass das Motivationsmodul Spurwechsel mit einer Quote von 89,9% richtig voraussagt. Insofern ist aus funktionaler Sicht eine weitere Optimierung weniger relevant. Jedoch enthält das interne Signal das die Spurwechselmotivation zusammenfasst, teilweise ausgeprägte Wertschwankungen. Diese resultieren aus der Zielsetzung für dieses Modul, möglichst jeden Spurwechselwunsch möglichst früh zu erkennen. In der sehr frühen Phase vor einem Spurwechsel sind aber die Merkmale für die Spurwechselmotivation oft noch uneindeutig und stark abhängig von der individuellen Situationseinschätzung eines jeden Fahrers, ob ein Spurwechsel begonnen wird oder nicht (vgl. 4.3.3). Um die Stabilität der Spurwechselprädiktion noch zu verbessern, wurde ein Ansatz auf Basis der Fuzzy-Logik in Kap. 7 erarbeitet.

Frage 3:

„Ist der Kompromiss der Parametrierung des letztmöglichen Bremsbeginns bezüglich Komfort und Sicherheit angemessen?“

Hinter dieser Frage steht abermals ein Zielkonflikt in der Auslegung des situationsadaptiven ACC/SWU-Systems. So erhöht ein später „letzter“ Bremsbeginn den Komfort für den Fahrer und Übertreten per Gaspedal des Fahrers sowie unerwünschtes Bremsen des Systems bleiben aus. Allerdings führt eine „aggressive“ Parametrierung bei falscher Prädiktion eines Spurwechsels zu sehr unkomfortablen und gegebenenfalls kritischen Annäherungssituationen.

Aus der geringen Zahl (7,3%) von Übertreten während eines Spurwechsels wird deutlich, dass für die meisten Fahrsituationen die Parametrierung des „letzten“ Bremsbeginns richtig gewählt worden war. Auch wird der „letzte“ Bremsbeginn nur in ca. 15,8% aller Fälle erreicht. Daneben hat diese Parametrierung auch zu keiner Verschlechterung der Sicherheit geführt. Dies belegt die Gesamtanzahl von nur zwei Übernahmesituationen in Spurwechselsituationen, die kausal direkt mit der Funktion Spurwechselunterstützung in Verbindung stehen.

Zusammenfassend bietet daher die aktuelle Parametrierung einen guten Kompromiss aus Sicherheit und Komfort. Eine gleichzeitige Erfüllung dieser konträren Ziele kann nur erreicht werden, wenn das Modul Spurwechselbeginn-Erkennung weiter verbessert wird. Hierdurch

wird es möglich, bei erkanntem Spurwechsel eine stärkere Unterschreitung des Sicherheitsabstands zum Vorderfahrzeug zuzulassen und so den Komfort zu erhöhen, ohne die Sicherheit zu gefährden. Gleichzeitig kann in allen anderen Situationen eine Bremsung früher eingeleitet und somit die Sicherheit und der Komfort gleichermaßen verbessert werden.

Frage 4:

„Ist die Spurwechselbeginn-Erkennung in der momentanen Ausprägung in Kombination mit der Spurwechselmotivation ein geeigneter Ansatz?“

Mit der momentanen Parametrierung bei der Spurwechselbeginn-Erkennung und Historie der Spurwechselmotivation durch ein Vorderfahrzeug kombiniert sind, wurden im Fahrversuch 2006 60,3% aller 368 Spurwechselsituationen aus Annäherung direkt erkannt. Wie in Kapitel 4.3.5 dargestellt, spiegelt sich in diesem Wert der Zielkonflikt aus Sensitivität versus Anzahl der Fehlauflösungen wider.

Mit dem einfachen und hochsensitiven Signal (Aktuelle-Spurwechselhandlung), das aus den Einzelindikatoren (Blinkerbetätigung (vgl. Kap. 4.3.5.1), Quergeschwindigkeit (vgl. Kap. 4.3.5.2), Time-to-Line-Crossing (vgl. Kap. 4.3.5.3) und Lenkradwinkel (vgl. Kap. 4.3.5.4) gebildet wird, würden 96,7% aller Spurwechsel erkannt. Nicht erkannte Spurwechsel sind hierbei dadurch gekennzeichnet, dass kein Blinken vorgelegen hat. Da wie beschrieben die Blinkerbenutzung aufgrund von Versuchsleitereffekten überdimensional hoch war, liegt hier für den späteren Einsatz noch Optimierungspotential. Die hohe Erkennungsquote des Signals (Aktuelle Spurwechselhandlung) geht allerdings einher mit einer hohen Zahl von Fehlauflösungen. So stehen bei 100 Auflösungen im Schnitt 49 berechnete Auflösungen 51 Fehlauflösungen entgegen. Betrachtet man allerdings das Signal, das neben den Indikatoren für eine aktuelle Spurwechselhandlung auch die Historie der Spurwechselmotivation enthält, so zeigt sich, dass sich die prozentuale Anzahl der erkannten Spurwechsel zwar auf 60,3% reduziert, dass die Fehlauflösungen aber überproportional zurückgehen. Mit dieser Signalkonditionierung stehen jetzt im Durchschnitt 94 berechtigten Auflösungen nur 6 Fehlauflösungen entgegen. Die gefundenen Ergebnisse sind in Tabelle 6.2 dargestellt.

N=368	Fahrversuch	
	<i>hochsensible SW Erkennung</i>	<i>stabile SW Erkennung</i>
Erkennungsquote	96,7%	60,3%
Gutauflösungen / Fehlauflösungen	49% / 51%	94% / 6%

Tabelle 6.2: Leistungsbewertung der Spurwechselbeginn-Erkennung

Zusammenfassend konnte für diese Fragestellung festgestellt werden, dass das Vorgehen zur Spurwechselbeginnerkennung, eine Kombination zu verwenden aus Erkennen der aktuellen Spurwechselhandlung und Nutzung der Historie der Spurwechselmotivation, zielführend ist. Allerdings muss der Konflikt zwischen Sensitivität und Fehlauflösungen durch einen neuen Ansatz (siehe Fuzzy-Logik Kap. 7.1.2) noch besser aufgelöst werden.

Frage 5:

„Wie viele Fehlauflösungen der Funktion Spurwechselunterstützung sind aufgetreten und welche Folgen sind daraus entstanden?“

In der Leistungsanalyse konnten für alle Probanden in Summe 438 „Fehlauflösungen“ der SWU-Funktion festgestellt werden. Hierbei wurde allerdings jedes unberechtigte „Aufklackern“ eines SWU-Signals, und sei es auch nur für einen Zeitschritt, als Fehlauflösung gewertet. Betrachtet man differenziert nur die Fehlauflösungen, in denen für den Fahrer eine spürbare Auswirkung vorgelegen hat, so reduziert sich die Zahl auf 137. Diese auf den ersten Blick hohe Zahl muss so interpretiert werden, dass der Fahrer diese Annäherungssituationen oder die betroffenen Teile von Annäherungen als unkomfortabler wahrnimmt. Diese Fehlauflösungen führen zwar zu einem gesteigerten Diskomfort (vgl. auch Frage 3) in den betroffenen Situationen, stellen aber keine Beeinträchtigung der Fahrsicherheit dar, die sich in einer erhöhten Zahl von Übernahmesituationen gezeigt hätte.

Frage 6:

„Wie gut ist die Performance in Einfädelsituationen und mit welchen Maßnahmen ist sie noch verbesserbar?“

Bei der Analyse der 45 aufgetretenen Einfädelsituationen zeigt sich, dass ein hoher Prozentsatz von 60% nicht erkannt wird. Zurückzuführen ist dies in 89% der Fälle darauf, dass die nach vorne gerichtete Radarsensorik das relevante Objekt aufgrund des zu geringen Öffnungswinkels oder wegen Verdeckungen nicht detektieren konnte. Nur in 11% der unterlassenen Auslösungen würde eine Verbesserung der Spurwechselmotivation in Einfädelsituationen die Zahl der unterstützten Situationen erhöhen. Aus diesem Grund wird auf eine weitere funktionale Optimierung verzichtet, da das deutlich größere Potential in dieser Fahrsituation in der Weiterentwicklung der Sensorik liegt.

## **6.5 Zusammenfassung der Ergebnisse**

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass wegen der ähnlichen Probandengruppen, des identischen Ablaufs des Fahrversuchs und des identischen Auswerteprozesses die beiden Fahrversuche direkt miteinander verglichen werden können. Trotzdem wurden bei einigen wenigen Merkmalen zwischen den beiden Baseline-Fahrten der Probandenstudien Abweichungen festgestellt. Diese wurden analysiert und beim direkten Vergleich der Fahrten mit ACC und ACC/SWU berücksichtigt. So konnten gesicherte Aussagen über die Akzeptanz des Systems sowie über Veränderungen des Fahrverhaltens durch das vernetzte, situationsadaptive ACC/SWU-System getroffen werden. Der direkte Vergleich der beiden Probandenstudien zueinander machte deutlich, dass sowohl die Akzeptanz beim Nutzer als auch das Fahrerverhalten sich positiv entwickelt haben. Bei der Analyse der Akzeptanz mit

Hilfe des Fragebogens zeigte sich der positive Einfluss des vernetzten ACC/SWU am deutlichsten an einer gestiegenen Systemverständlichkeit, einem Rückgang von Kompensationshandlungen wie dem Übertreten sowie einer Verbesserung der subjektiven Bewertung von Überholsituationen.

Die Auswertung der Messdaten erbrachte, dass durch das situationsadaptive ACC/SWU eine Rückentwicklung zurück zu einem natürlichen Fahrverhalten erreicht werden konnte. Deutlich ablesbar war dies am Rückgang von Übertreten per Gaspedal, an der Angleichung des Ausscherabstandes und der Ausscherzeitlücke sowie einer Normalisierung des Spurwechselverhaltens hinsichtlich der Verteilung der Spurwechselklassen. Unterschieden sich diese Merkmale im Fahrversuch 2005 noch deutlich und signifikant zwischen der Fahrt ohne ACC und der Fahrt mit dem Serien-ACC, so waren mit dem situationsadaptiven, vernetzten ACC/SWU-System keine systematischen Verhaltensänderungen in diesen Größen mehr feststellbar.

Ferner konnte mit der Leistungsbewertung des situationsadaptiven ACC/SWU-Systems das Potential und die noch bestehenden Schwächen und Optimierungsansätze für die Funktion objektiv analysiert werden. Deutlich wurde, dass die Funktion im überwiegenden Teil aller Situationen den Fahrer wirkungsvoll unterstützt. Verbesserungspotential konnte beim Verhältnis zwischen berechtigten und unberechtigten Auslösungen identifiziert werden. Daneben zeigte sich, dass die Stabilität der internen Größen der Funktion noch verbessert werden sollte, um durchgängige Entscheidungsprozesse und eine einheitliche Unterstützung in allen Situationen garantieren zu können. Als vielversprechende Handlungsfelder wurden die Module zur Beginnerkennung von Spurwechseln und zur Voraussage einer Spurwechselmotivation identifiziert. Um zum Zweck einer Prädiktion insbesondere die Unschärfe in der menschlichen Entscheidungsbildung und Situationsanalyse abbilden zu können, wird ein neuer Ansatz mit Hilfe der Fuzzy-Logik umgesetzt. Es ist zu erwarten, dass sich insbesondere der zusätzliche Freiheitsgrad der graduellen Zugehörigkeit aus der Fuzzy-Logik zur Beschreibung von Motivationskriterien positiv auf die Gesamtfunktion auswirken wird.

## 7 Optimierungspotential durch Fuzzy-Logik

Fuzzy<sup>6</sup> Logic zählt zu den Methoden der künstlichen Intelligenz (KI). Unter diesem Stichwort sind mathematische Beschreibungsformen wie neuronale Netze, Hidden Markow Modelle und weitere Verfahren zusammengefasst. Überblicke über Methoden der KI findet man beispielsweise bei [Opwis 1992]. Mit diesen Werkzeugen der künstlichen Intelligenz wird versucht, nicht-lineare Wahrnehmungs-, Entscheidungs- und Handlungsprozesse des Menschen abzubilden.

Für das situationsadaptive, nutzerzentrierte ACC/SWU wurde als Methode die Fuzzy-Logik ausgewählt, da sie sich besonders eignet, die Unschärfe in der menschlichen Informationsverarbeitung und Entscheidungsprozessen abzubilden. Grundsätzlich beruht die Fuzzy-Logik auf der Verallgemeinerung der klassischen Mengenlehre und stellt eine Erweiterung der zweiwertigen Booleschen Logik dar. Grundlage sind die sogenannten unscharfen Mengen, auch Fuzzy Sets genannt. Die Zugehörigkeit eines Elementes zu einer Fuzzy-Menge  $M$  wird nicht mit der zweiwertigen Logik ausgedrückt, sondern es wird eine graduelle Zugehörigkeit, die durch eine Funktion im Einheitsintervall  $[0, 1]$  als Wertemenge bestimmt wird, zugelassen. Mit diesen unscharfen Mengen können linguistische Variablen mathematisch beschrieben werden. Regeln der Form „Wenn A, Dann B“ verwenden diese sprachlichen Variablen, um das menschliche Denken und Handeln nachzubilden. Die Fuzzy-Logik beschreibt Konzepte zur Bildung und Verknüpfung unscharfer Mengen, um daraus Schlussfolgerungen zu ziehen. Auf diese Art und Weise entsteht eine einfache Wissensrepräsentation, die der rechnergestützten Verarbeitung zugänglich ist (vgl. [Bote 1993]). Die Theorie der unscharfen Mengen wurde 1965 von Lotfi A. Zadeh an der Universität Berkeley in Kalifornien entwickelt. Heute wird Fuzzy-Logik in den unterschiedlichsten Bereichen eingesetzt, wenn mathematische Modelle zu kompliziert oder nicht möglich sind. Einen guten Überblick über die Vielfältigkeit der Einsatzmöglichkeit von Fuzzy-Logik bieten [Pfeiffer et al. 2002]. Sehr erfolgreich ist dies z.B. in der Regelungstechnik (Fuzzy Control) gelungen (vgl. [Börcsök 2000]). In den letzten Jahren hat die Fuzzy-Logik vermehrt Einzug in die Automobiltechnik gehalten. Wurden in der Frühphase nur komfortrelevante, regelungstechnische Probleme, wie z.B. die Temperaturregelung in Klimaanlage (vgl. [Sousa et al. 1997]), mittels Fuzzy-Logik gelöst, so erobert die Fuzzy-Logik neuerdings verstärkt sicherheitsrelevante Teilfunktionen. Auch innerhalb der Fahrerassistenzsysteme wurde diese Methode schon zur Unterstützung des Fahrers wirkungsvoll eingesetzt. Bei [Schmitt & Färber 2005] konnte hiermit das Bremsverhalten von Normalfahrern in Realfahrten analysiert und eine Entscheidung zwischen einer Notbremsung und einer starken Bremsung getroffen werden. Bei [Juergensohn 1997] wurde Fuzzy-Logik zur Modellierung eines Geschwindigkeitsreglers auf kurvigen Straßen verwendet. Auch zur Modellierung der Querregelung eines Fahrzeugs wurde Fuzzy-Logik erfolgreich z.B. bei [Bonny et al. 2001] eingesetzt. [Rekersbrink 1994], [Irmscher 2001] und

---

<sup>6</sup> Engl. fuzzy = unscharf, ungenau

[McDonald et al. 1997] setzten Funktionalitäten der Fuzzy-Logik im Kontext der Spurwechselprädiktion erfolgreich ein.

## 7.1 Anwendung von Fuzzy-Logik

Innerhalb des vernetzten ACC/SWU-Systems wurden durch die Leistungsanalyse (Kap. 6.4) die Module Spurwechselmotivation und -beginnerkennung als Handlungsfelder für eine Umsetzung mittels Fuzzy-Logik identifiziert. Für diese Module ist Fuzzy-Logik besonders geeignet, da hier verstärkt unscharfe Entscheidungsprozesse und die Nichtlinearitäten in der Wahrnehmung auftreten. Diese können über die kontinuierlichen Übergänge in der Fuzzy-Logik sehr gut modelliert werden. Generell wird Fuzzy-Logik bei der Verbesserung der Prädiktion der Spurwechselmotivation und zur Spurwechselbeginn-Erkennung als Inferenzmechanismus, also wie ein Expertensystem, verwendet. Die Grundlagen der in dieser Arbeit eingesetzten Methoden der Fuzzy-Logik sind im Anhang B zu finden. Hierbei soll die Betrachtung der Eingangsgrößen nur so differenziert durchgeführt werden, wie es für die Entscheidungsbildung erforderlich ist, da als Ausgangswert wiederum ein scharfer Ausgabewert Spurwechselwunsch ja oder nein, respektive Spurwechselhandlung bereits begonnen oder nicht, gebildet werden muss. Auf Basis von Einzelmerkmalen und deren Kombinationen wird dann eine Entscheidung getroffen. Die Vorgehensweise kann deshalb als approximatives Schließen auf Basis von Fuzzy-Logik bezeichnet werden.

Um die Vergleichbarkeit der Module untereinander und die Nachvollziehbarkeit von Schlussfolgerungen zu vereinfachen, wurden innerhalb der Weiterentwicklung durchgängig die gleichen Fuzzy-Operatoren angewendet. Als Inferenz-Methode wird die MAX-MIN-Inferenz ausgewählt. Die (boolesche) Ausgangsgröße wird mit zwei Singletons beschrieben. Die Funktionsweise eines Fuzzy-Systems mit dieser Konfiguration ist in Bild 7.1 exemplarisch dargestellt.

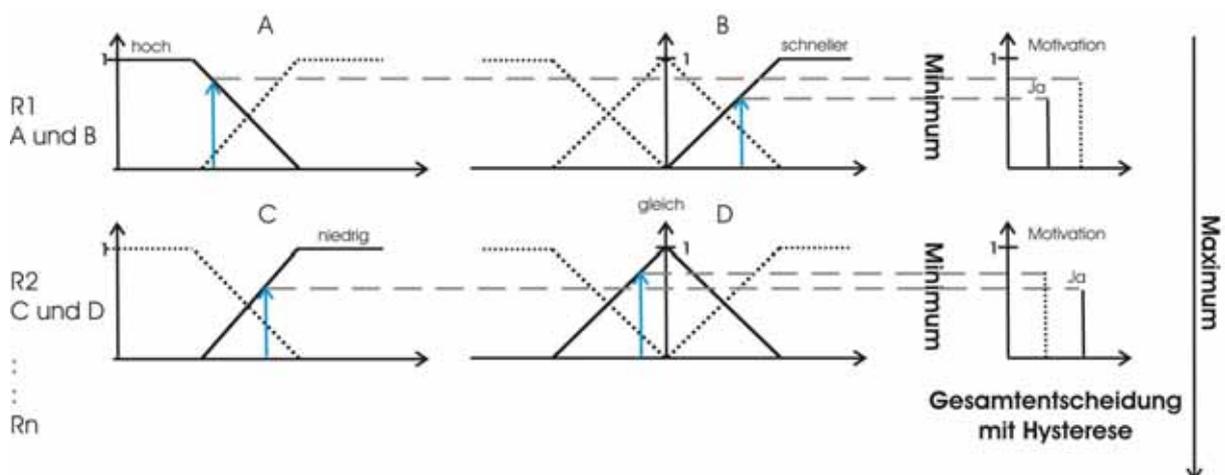


Bild 7.1: Anwendung der Fuzzy-Logik für die Spurwechselunterstützung

Hierbei stehen die zwei Regeln R1 und R2 stellvertretend für die Gesamtzahl aller relevanten Teilbedingungen. Als Fuzzy-Mengen für die Eingangsgrößen werden Dreiecke und Trapeze

verwendet. Beide können mit wenigen Parametern eindeutig festgelegt werden und liefern ausreichend viele Freiheitsgrade für die Beschreibung.

Der scharfe Ausgangswert wird in Form von Singletons modelliert und die Gesamtentscheidung anschließend über eine Hysterese stabilisiert. Die Verwendung von Singletons hat den Vorteil, dass der Einfluss des Implikations-Operators sehr gering ist. Da das Singleton eine scharfe Zahl und keine Menge repräsentiert, haben z.B. Mamdani-Implikation und das Algebraische Produkt das gleiche Resultat.

In den folgenden beiden Kapiteln werden nun die Fuzzy-Sets sowie die jeweiligen Regelwerke vorgestellt. Als Indikatoren zur Spurwechselmotivation und Spurwechselbeginn-Erkennung werden die gleichen Indikatoren, wie sie auch in der numerischen Funktionsdefinition Kap. 4 verwendet wurden, eingesetzt. In einigen Bereichen wurden im Zuge der Umstrukturierung durch Fuzzy-Logik Anpassungen und Optimierungen bei den eingesetzten Kriterien und deren Schwellwerten vorgenommen.

### 7.1.1 Fuzzy-Logik in der Spurwechselmotivation

Der Aufbau der Spurwechselmotivation in der Umsetzung mit Fuzzy-Logik ist ähnlich zur Struktur der Funktion in ihrer numerischen Umsetzung (siehe Kap 4.3.3). Zur Generierung der Gesamtmotivation werden die Indikatoren Wunschgeschwindigkeit, Differenzgeschwindigkeit und Längsbeschleunigung sowie die Eintauchstärke verwendet. Das vorgeschaltete Geschwindigkeitsanalysemodul (Kap 4.3.3.1) wird in die Fuzzy-Funktion integriert und läuft nicht länger funktional getrennt ab. Die ausführliche Herleitung der Einzelkriterien sowie die statistische Auswertung der Indikatoren aus der Probandenstudie können in Kap. 4.3 nachgelesen werden. Im Folgenden werden die entstandenen Änderungen innerhalb der Funktion sowie die Fuzzifizierung und das Regelwerk vorgestellt.

#### 7.1.1.1 Kriterien und Parametrierung

##### Motivator Wunschgeschwindigkeit

Analog zur numerischen Modellierung werden bei der Wunschgeschwindigkeit die Toleranzschwellen aus Kap 4.3.3.1.1 als Grundlage verwendet. Hierbei wird der ermittelte Wert für die relative Wunschgeschwindigkeitsdifferenz von  $\pm 0,2$  für die Parametrierung verwendet. Bild 7.2 zeigt die gewählte Fuzzifizierung des Motivators relative Wunschgeschwindigkeit.

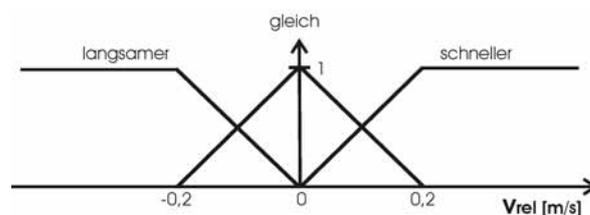


Bild 7.2: Parametrierung des Motivators Wunschgeschwindigkeit

Der relevante Sonderfall, dass die Wunschgeschwindigkeit niedriger ist als die aktuelle Istgeschwindigkeit, wurde in der numerischen Umsetzung über das vorgeschaltete Geschwindigkeitsprüfungsmodul abgedeckt. Dieser Fall kann im normalen Fahren zwei Ursachen haben, zum Einen kann der Fahrer durch Tip-Down die Wunschgeschwindigkeit reduzieren, zum anderen hat er die Möglichkeit, durch kurzfristiges Übertreten die Fahrgeschwindigkeit zu erhöhen. Beide Situationen können dazu führen, dass die aktuelle Fahrgeschwindigkeit höher liegt als die Wunschgeschwindigkeit. Eine separate Betrachtung dieser beiden Fälle ist erforderlich, und nur durch das Miteinbeziehen der Geschwindigkeit des Vorderfahrzeugs kann die Situation richtig interpretiert werden (vgl. auch 4.3.3.1). Für eine Analyse muss noch der Umstand mit einbezogen werden, dass sich die Wunschgeschwindigkeit auf die angezeigte Geschwindigkeit am Tachometer bezieht. Zwischen der angezeigten Geschwindigkeit und der realen Fahrgeschwindigkeit besteht jedoch immer eine Abweichung, die aus dem Voreilen des Tachometers herrührt. Dieser Umstand muss bei der Parametrierung des Motivators Wunschgeschwindigkeit miteinbezogen werden. Die ermittelte Differenz zwischen der Geschwindigkeit des Vorderfahrzeugs und der Wunschgeschwindigkeit wird innerhalb der Fuzzifizierung ähnlich parametrierung wie der Indikator Differenzgeschwindigkeit. Die Fuzzy-Mengen aus Bild 7.3 müssen so interpretiert werden, dass  $v_{TO}$  entweder kleiner als  $v_{wunsch}$  ( $\Rightarrow$  Überholwunsch) oder größer ( $\Rightarrow$  kein Überholwunsch) ist.

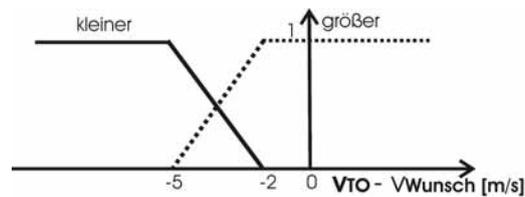


Bild 7.3: Sonderfall der Wunschgeschwindigkeit

### Motivator Differenzgeschwindigkeit

Die Parametrierung der Fuzzy-Sets für den Motivator Differenzgeschwindigkeit orientiert sich an der Datenauswertung in Kapitel 4.3.3.1.3. Grundsätzlich gilt weiterhin, dass bei niedrigen Relativgeschwindigkeiten ein geringerer Überholwunsch zu erwarten ist. Der Einfluss der Beschleunigungsdifferenz zum Vorderfahrzeug, der in der numerischen Betrachtung bis zu 20% Reduzierung des Motivators bewirkt hat, wurde bei der Fuzzifizierung abgetrennt und über ein darauf angepasstes Regelwerk als eigener Einflussfaktor modelliert. Die Parametrierung des Motivators Differenzgeschwindigkeit ist in Bild 7.4 zu sehen.

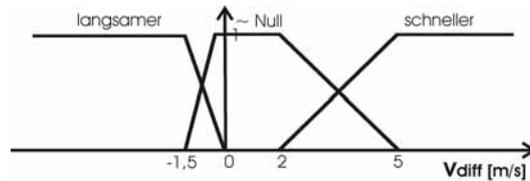


Bild 7.4: Parametrierung des Motivators Differenzgeschwindigkeit

Der Einfluss der Beschleunigungsdifferenz ist immer dann relevant, wenn die Differenzgeschwindigkeit in der Fuzzifizierung nahe Null ist. Ist die Beschleunigung des eigenen Fahrzeugs hierbei deutlich höher als die des Vorderfahrzeugs, so soll auch bei Differenzgeschwindigkeiten nahe Null ein Überholwunsch möglich sein, wenn die anderen erforderlichen Kriterien erfüllt sind. Eine einfache Beschreibung über zwei Fuzzy-Prädikate, wie in Bild 7.5 dargestellt, ist hierbei ausreichend.

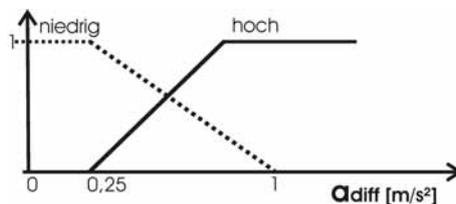


Bild 7.5: Parametrierung der relativen Längsbeschleunigung

### Motivator Eintauchstärke

Analog zur numerischen Berechnung wird der Motivator Eintauchstärke in Kombination mit der Dynamikgrenze eingesetzt. Allerdings wird dieser Motivator in seiner Bedeutung aufgewertet und ist nun ein zwingendes Kriterium für die Bildung eines Spurwechselwunsches. Der Multiplikator Dynamikgrenze aus der numerischen Berechnung wird jetzt als Höhe einer Zugehörigkeitsfunktion interpretiert. Die Parametrierung und der quadratische Übergang analog zur numerischen Umsetzung bleiben erhalten. Bild 7.6 zeigt die verwendete Parametrierung.

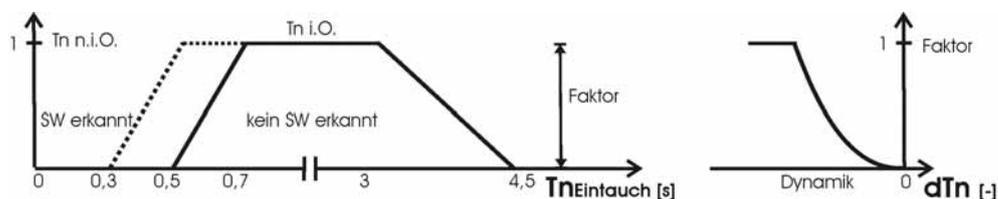


Bild 7.6: Parametrierung des Motivators Eintauchstärke

#### 7.1.1.2 Regelbasis

Die Erstellung der Regelbasis beruht auf der Analyse typischer Überholsituationen und nachfolgenden logischen Optimierungen. Die einzelnen Teilbedingungen sind über UND/Minimum-Bedingungen verknüpft. Das Kriterium Eintauchstärke wirkt hierbei wie eine

Klammer und ist ein Freigabekriterium für die anderen Kriterien. Die entsprechenden Sondersituationen, in denen die Tachogeschwindigkeit oder die Beschleunigungsdifferenz ausgewertet werden müssen, sind aus Tabelle 7.1 ersichtlich.

$T_n$ Eintauch	$v_{Diff}$	$v_{Wunsch}$	(Sonderfall)	Motivation
n.i.O.	--	--	--	Nein
i.O.	langsamer	--	--	Nein
i.O.	~ Null	NOT (schneller)	--	Nein
i.O.	~ Null	schneller	$a_{diff}$ niedriger	Nein
i.O.	~ Null	schneller	$a_{diff}$ höher	Ja
i.O.	schneller	langsamer	$v_{TO}$ größer	Nein
i.O.	schneller	langsamer	$v_{TO}$ kleiner	Ja
i.O.	schneller	NOT (langsamer)	--	Ja

Tabelle 7.1: Fuzzy-Logik Regelbasis für die Spurwechselmotivation

Mit insgesamt acht Regeln lässt sich nach logischem Zusammenfassen das Motivationsmodul vollständig beschreiben. Die Entscheidungsbildung konnte somit durch den Einsatz von Fuzzy-Logik in Relation zum numerischen Modell vereinfacht und transparenter gestaltet werden.

## 7.1.2 Fuzzy-Logik in der Spurwechselbeginn-Erkennung

In der numerischen Umsetzung, wie in Kapitel 4.3.5 beschrieben, wurden als Indikatoren für einen Spurwechsel der Blinker, die Quergeschwindigkeit, die Time-to-Line-Crossing und der kurvenbereinigte Lenkradwinkel verwendet. Für jedes Signal wurde bisher eine Kennlinie definiert, die zu einem Eingangswert einen Motivationswert zwischen 0 (kein Spurwechsel erkannt) und 1 (Spurwechsel erkannt) liefert. Über den Mittelwert aus den Einzelwerten und eine Beruhigung mittels einer Hysterese wurde dann die Entscheidung abgeleitet. An diesem Ansatz wird auch bei der Modellierung mittels Fuzzy-Logik weiter festgehalten. Auf eine Abbildung des Indikators Blinker durch Fuzzy-Logik kann verzichtet werden, da das Blinkersignal direkt einen scharfen Wert darstellt, der nur wahr („true“) oder falsch („false“) sein kann.

### 7.1.2.1 Kriterien und Parametrierung

#### Quergeschwindigkeit

Bei der Quergeschwindigkeit erfolgt die Parametrierung der Fuzzy-Sets anhand der zeitlichen Verteilung der Quergeschwindigkeit im Verlauf eines Spurwechsels aus Bild 4.40 (Kap. 4.3.5.2). Zwei Fuzzy-Mengen sind hierbei ausreichend, um eine hohe und eine niedrige Quergeschwindigkeit zu beschreiben. Der kontinuierliche Anstieg von  $v_{quer}$  wird über einen linearen Übergang modelliert. Bild 7.7 zeigt die resultierenden Fuzzy-Sets.

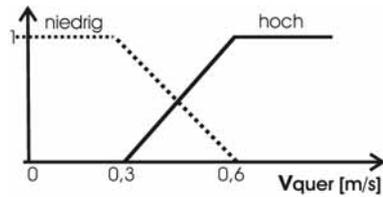


Bild 7.7: Parametrierung der Quergeschwindigkeit

### Time-to-Line-Crossing

Für die Bestimmung der Fuzzy-Mengen werden abermals feste Zeitpunkte vor dem Spurwechsel untersucht und die Analyse analog zur statistischen Datenauswertung in 4.3.5.3 durchgeführt. Als Stützstellen für die zwei Fuzzy-Mengen werden 0,75 s und 1,5 s ausgewählt (siehe Bild 7.8). Eine Differenzierung in eine höhere Zahl von Fuzzy-Sets ist aufgrund der vorhandenen Streuung der TLC nicht sinnvoll.

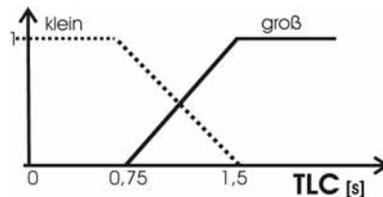


Bild 7.8: Parametrierung der Time-to-Line-Crossing

### Kurvenbereinigter Lenkradwinkel

Die Stützstellen der Fuzzy-Mengen des kurvenbereinigten Lenkradwinkels werden anhand der statistischen Analyse aus Kapitel 4.3.5.4 ausgewählt. Die Parametrierung erfolgt hierbei in Abhängigkeit von der momentan gefahrenen Geschwindigkeit. Im Übergangsbereich zwischen 100 km/h und 130 km/h wird linear interpoliert, ansonsten werden feste Werte verwendet. Die so resultierende Parametrierung für den Lenkradwinkel ist in Bild 7.9 dargestellt.

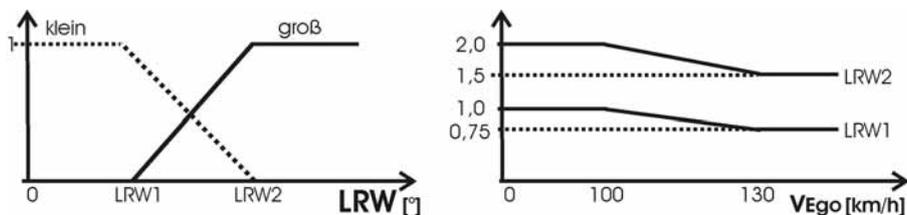


Bild 7.9: Parametrierung des kurvenbereinigten Lenkradwinkels

Das Ziel, ein frühzeitiges Erkennen eines Spurwechsels zum Zeitpunkt des Beginns, kann so zuverlässig erreicht werden.

### 7.1.2.2 Regelbasis

Für die Spurwechselbeginn-Erkennung stehen somit erneut vier Indikatoren mit jeweils zwei Fuzzy-Mengen zur Verfügung. Hieraus resultieren durch Linearkombination 16 Kombinationen bzw. Regeln. Für jede Regel muss die resultierende Schlussfolgerung, ob ein Spurwechsel folgen wird, festgelegt werden.

Durch die große Datenbasis der 615 für die Auswertung zur Verfügung stehenden Spurwechsel bietet es sich an, den Erfüllungsgrad jeder Kombination zu festen Zeitpunkten vor dem Spurwechsel zu untersuchen. Die Analyse der Einzelindikatoren aus Kap. 4.3.5 hat gezeigt, dass eine sichere Voraussage nur bis maximal 2 s vor dem Spurwechselbeginn möglich ist. Um Fehlauflösungen vor einem Spurwechsel ausschließen zu können, wird der Analysezeitraum auf 5 s vor dem Spurwechsel erhöht. Tabelle 7.2 zeigt das Ergebnis der Analyse für alle Spurwechsel der Fahrstudien.

Nr	LRW	$v_{quer}$	TLC	Blinker	0,0 s	-0,5s	-1,0s	-1,5s	-2,0s	-3,0s	-4,0s	-5,0s	SW-erkannt
1	Klein	Niedrig	Gross	Aus	0%	0%	7%	28%	55%	82%	87%	86%	Nein
2	Klein	Niedrig	Gross	Ein	0%	3%	27%	28%	17%	5%	3%	2%	Nein
3	Klein	Niedrig	Klein	Aus	0%	2%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	Nein
4	Klein	Niedrig	Klein	Ein	4%	17%	5%	0%	1%	0%	0%	0%	Ja
5	Klein	Hoch	Gross	Aus	0%	0%	4%	4%	3%	3%	3%	3%	Nein
6	Klein	Hoch	Gross	Ein	0%	3%	21%	7%	3%	1%	0%	1%	Ja
7	Klein	Hoch	Klein	Aus	16%	8%	1%	0%	0%	0%	1%	1%	Ja
8	Klein	Hoch	Klein	Ein	75%	53%	5%	0%	1%	2%	2%	1%	Ja
9	Gross	Niedrig	Gross	Aus	0%	0%	6%	14%	13%	7%	3%	4%	Nein
10	Gross	Niedrig	Gross	Ein	0%	2%	22%	17%	6%	0%	1%	1%	Ja
11	Gross	Niedrig	Klein	Aus	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	Ja
12	Gross	Niedrig	Klein	Ein	1%	6%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	Ja
13	Gross	Hoch	Gross	Aus	0%	0%	2%	0%	0%	0%	0%	1%	Nein
14	Gross	Hoch	Gross	Ein	0%	2%	6%	2%	1%	0%	0%	0%	Ja
15	Gross	Hoch	Klein	Aus	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	Ja
16	Gross	Hoch	Klein	Ein	0%	6%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	Ja
					100%	99%	61%	27%	12%	4%	4%	3%	Ja (kumuliert)
					0%	6%	47%	74%	88%	96%	96%	97%	Nein (kumuliert)

Tabelle 7.2: Fuzzy-Logik Regelbasis für die Spurwechselbeginn-Erkennung

Als Schlussfolgerung wird die Mamdani-Implikation (Minimum) verwendet. Bei der Interpretation des Ergebnisses muss berücksichtigt werden, dass eine Kombination mit Fuzzy-Mengen bei einem Spurwechsel zu einem festen Zeitpunkt genau eine unscharfe Schlussfolgerung erzeugt. Anschließend werden diese Einzelergebnisse addiert und das Ergebnis durch die Gesamtzahl der Ergebnisse geteilt. Hieraus entstehen die Prozentwerte der Tabelle. Dass die Summe der Prozente zu einem festen Zeitpunkt größer als 100% sein kann, ist auf Rundungsfehler innerhalb der einzelnen Prozentangaben und den Prozess des unscharfen Schließens zurückzuführen. Insgesamt erlaubt diese Tabelle zwei Interpretationsmöglichkeiten. Zum einen zeigt sie, welche Kombination von Indikatoren welches Ergebnis erzielt und damit welche Schlussfolgerung zu wählen ist, zum anderen zu welchem Zeitpunkt welcher Indikator zu wirken beginnt. Die erste Kombination, bei der jeder einzelne Indikator keinen Spurwechsel erkennt, ist bis 2 s vor dem Spurwechsel dominant. Dies deckt sich mit den Erwartungswerten aus der statistischen Auswertung der Indikatoren aus Kapitel 4.3.5, in der gezeigt werden konnte, dass eine Prädiktion eines Spurwechsels über 2 s hinaus mit den gewählten Indikatoren nicht möglich ist. Im zeitlichen Verlauf zwischen 2 Sekunden vor und zu Spurwechselbeginn gewinnen Kombinationen mit einem großen Lenkradwinkel (LRW) an Bedeutung, da der Spurwechsel durch Lenken aktiv eingeleitet wird. Zum

Zeitpunkt 0 s ist der Lenkradwinkel wieder klein, folglich auch die Time-to-Line-Crossing (TLC) gering und die Quergeschwindigkeit ( $v_{\text{quer}}$ ) hoch. Darüber hinaus spiegelt sich im Ergebnis die gefundene hohe Blinkerbetätigung wider. Daneben zeigt das Resultat, dass die Kombination, bei der alle Kriterien gemeinsam erfüllt sind, sehr selten auftritt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die einzelnen Kriterien zeitlich versetzt einen Spurwechsel anzeigen. Für jede Kombination der Fuzzy-Mengen wird eine Schlussfolgerung festgelegt und damit die Regelbasis vollständig besetzt. Bedingung ist dabei, dass ein Indikator allein keinen Spurwechsel freigeben darf. Beispielsweise kündigt der Blinker einen Spurwechsel an. Trotzdem darf dieser Indikator nur in Kombination mit einem weiteren Indikator, der ein aktives Einleiten eines Spurwechsels anzeigt, diesen freigeben. Auch ein isoliert auftretender, hoher Lenkradwinkel darf keine Spurwechselbeginn-Erkennung auslösen. Diese Bedingungen sind erforderlich, um die Zahl der Fehlauflösungen auf ein Minimum zu reduzieren. Durch eine mathematische Zusammenfassung der Regelbasis kann diese auf acht Regeln reduziert werden (siehe Tabelle 7.3).

<i>LRW</i>	<i>v<sub>quer</sub></i>	<i>TLC</i>	<i>Blinker</i>	<i>SW-erkannt</i>
Gross	--	Klein	--	Ja
--	--	Gross	Aus	Nein
Gross	--	Gross	Ein	Ja
Klein	Hoch	Klein	--	Ja
Klein	Niedrig	Gross	Ein	Nein
Klein	Niedrig	Klein	Aus	Nein
Klein	Niedrig	Klein	Ein	Ja
Klein	Hoch	Gross	Ein	Ja

Tabelle 7.3: Reduzierte Regelbasis für die Spurwechselbeginn-Erkennung

## 7.2 Leistungsbewertung des Verbesserungspotentials durch Fuzzy-Logik

Für eine objektive Bewertung der entwickelten Fuzzy-Module wurde ein Vergleich mit der numerischen Umsetzung aus Kap. 4 durchgeführt. Für die in der Probandenstudie eingesetzte numerische Version liegen die Ergebnisse der Leistungsbewertung in Kapitel 6.4 vor. Um die Ergebnisse vergleichen zu können, werden die aufgezeichneten Messdaten der Fahrstudie als Eingangsgröße für das mit Fuzzy-Logik verbesserte, situationsadaptive ACC/SWU verwendet. De facto kann so zwar das Fahrerverhalten nicht verändert werden, z.B. bleibt ein ACC/SWU-Bremsvorgang bestehen, allerdings können Fragestellungen aus der Situationsanalyse eindeutig und reproduzierbar überprüft werden. Zudem kann die Qualität der Ergebnisse (Signaleinbrüche, Fehlauflösungen) aus der numerischen und der Fuzzy-Funktion zweifelsfrei verglichen werden.

Für die Umsetzung wurde ein Offline-Testverfahren mit Matlab erarbeitet. In dieser Testumgebung konnte derselbe Algorithmus, der auch im Versuchsfahrzeug die Spurwechselunterstützung errechnet, integriert werden. Um das Testverfahren zu validieren, wurde in einem Vortest der numerische Referenz-Algorithmus aus der Probandenstudie in die Testumgebung integriert. Anschließend wurden die so erzeugten Ergebnisse mit den aus der

Probandenstudie im Versuchsfahrzeug real aufgezeichneten Ergebnissen verglichen. Da hierbei keine Abweichungen festgestellt werden konnten, wurde die Testumgebung für die Leistungsbewertung der Fuzzy-Logik Algorithmen verwendet.

Bei der Spurwechselbeginn-Erkennung (Tabelle 7.4) erfasst die bisherige numerische Umsetzung bereits 99% aller Spurwechsel nach links, wenn dabei der Blinker betätigt wird. Das neue Fuzzy-Modul zur Spurwechselbeginn-Erkennung erreicht, wenn der Blinker betätigt ist, einen gleich hohen Wert. Die Stärke des neuen Moduls mit der angepassten Parametrierung liegt bei Spurwechseln ohne Blinker. Hier konnte die Erkennungsrate von 36% auf 91% gesteigert werden. Da im normalen Alltag nur in ca. zwei von drei Spurwechseln der Blinker gesetzt wird (vgl. [ADAC 2007]), ist dies eine wirkungsvolle Verbesserung. Gleichzeitig werden die Fehlauflösungen deutlich reduziert. Hier zeigt sich die Stärke der hohen Flexibilität durch Fuzzy-Logik. Mit Regeln können Kombinationen der Eingangsgrößen eindeutig festgelegt werden, während die Mittelwertbildung keine gerichtete Logic beinhaltet.

	<i>Num. Berechnung</i>	<i>Fuzzy Logic</i>
<b>Gesamtanzahl SW mit Blinker</b>	<b>796</b>	
Erkennung ohne SW-Motivation	790 (99%)	793 (99%)
<b>Gesamtanzahl SW ohne Blinker</b>	<b>60</b>	
Erkennung ohne SW-Motivation	22 (36%)	55 (91%)
Fehlauflösungen ohne Motivation	850	322
Spurwechselerkennung inkl. Motivation	258	327
Fehlauflösungen mit Motivation	16 (6%)	29 (8%)

*Tabelle 7.4: Spurwechselbeginn-Erkennung numerische Umsetzung und Fuzzy-Logik im Vergleich*

Die hohe Zahl der Fehlauflösungen der Spurwechselbeginn-Erkennung resultiert zum überwiegenden Teil daraus, dass in 60% der 322 Fehlauflösungen ein Blinkersignal vorhanden war, aber kein Spurwechsel eingeleitet worden ist. Diese Fehlinterpretation des Blinkersignals in Kombination mit weiteren Auslösekriterien entsteht hauptsächlich deshalb, weil die Spurwechselbeginn-Erkennung sehr sensibel ausgelegt worden ist. Ein leichtes Pendeln in der Fahrspur, verbunden mit einem gesetzten Blinker, kann dazu führen, dass die Situation durch Auswertung der Motivatoren Quergeschwindigkeit, TLC und Lenkradwinkel, fälschlicherweise als Spurwechsel interpretiert wird. In Annäherungssituationen stehen zur Plausibilisierung noch die Historie der Spurwechselmotivation und der Ausscherkorridor (siehe Kap. 4.3.5) zur Verfügung. Hiermit kann die Zahl der erlebbaren Fehlauflösungen abgesenkt werden. Daneben konnte durch Fuzzy-Logik die Signalstabilität verbessert werden.

Beim Modul Motivation werden alle Spurwechsel aus Annäherung untersucht. Der Anteil der unterstützten Spurwechsel liegt sowohl bei der numerischen Umsetzung als auch bei der Fuzzy-Umsetzung bei ca. 89%. Dass hier keine Verbesserung erreicht werden konnte, liegt an der Parametrierung beider Umsetzungen, in der Überholvorgänge mit niedriger Relativgeschwindigkeit nicht unterstützt werden. Dieser Ansatz wurde beibehalten, da bei niedrigen Differenzgeschwindigkeiten kein eindeutiger Überholwunsch abgeleitet werden kann und in vielen Fällen eine Folgefahrt erwünscht ist. Außerdem ist das erreichbare Verbesserungspotential für den Fahrer durch die situationspezifische Reglerreaktion hier nur sehr gering, da

schon das Serien-ACC in diesen Situationen nur mittels Motorschleppmoment den Abstand einregelt. Trotzdem konnte durch die verbesserte Stabilität des Signals Spurwechselformulation eine erhebliche Reduzierung von 383 Signalsprüngen und Signaleinbrüchen auf 77 und damit eine Erhöhung des Annäherungskomforts erreicht werden. Zurückzuführen ist dies direkt auf die verbesserte Signalkonditionierung und die überarbeiteten Indikatoren.

Neben der Signalstabilität konnte auch die Signalgüte deutlich optimiert werden. Bei stabiler Anzahl von berechtigten Auslösungen (527) konnte die Zahl der Fehlauflösungen der SWU von 228 auf 199 reduziert werden (vgl. Tabelle 7.5). Fehlauflösungen sind nach Definition Situationen, in denen eine Spurwechselsituation prädiziert, aber kein Spurwechsel unmittelbar eingeleitet wird. Fehlauflösung bedeutet dabei nicht zwangsläufig einen unkomfortablen Einregelvorgang für den Fahrer, sondern eine fehlerhafte Klassifikation der Situation als zu unterstützende Spurwechselsituation.

	<i>Num. Berechnung</i>	<i>Fuzzy Logic</i>
<b>Anzahl Annäherungsspurwechsel</b>	<b>368</b>	
<b>Gesamtauflösungen der SWU</b>	<b>527</b>	<b>527</b>
<b>berechtigte Auflösungen</b>	<b>299 (57%)</b>	<b>328 (63%)</b>
<b>unberechtigte Auflösungen</b>	<b>228 (43%)</b>	<b>199 (37%)</b>
<b>Signalschwankungen</b>	<b>383</b>	<b>77</b>

*Tabelle 7.5: Leistungsanalyse der Spurwechselunterstützung numerische Umsetzung und Fuzzy-Logik*

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass die Fuzzy-Logik das situationsadaptive, fahrerzentrierte, vernetzte ACC/SWU in seiner Qualität und Stabilität verbessern konnte, ohne die Zahl der Fehlauflösungen zu erhöhen. Im Gegenteil konnten diese sogar durch optimierte Parametrierungsmöglichkeiten noch gesenkt werden. Erreicht wurde dies durch die Nachbildung der Unschärfe der menschlichen Entscheidungsprozesse über linguistische Variablen, Zugehörigkeitsfunktionen und die spezifische Auswertung der Daten der Probandenstudie. Neben diesen quantifizierbaren Vorteilen durch Fuzzy-Logik ermöglicht diese auch die Verbesserung der Struktur der Gesamtfunktion. So konnte die Anzahl der erforderlichen Hysteresen und die damit verbundenen Totzeiten in der Systemreaktion dank optimierter Signalkonditionierung wesentlich reduziert werden. Insgesamt wurde es durch den Einsatz von Fuzzy-Logik möglich, das Potential des situationsadaptiven, fahrerzentrierten Ansatzes für die Verbesserung des ACC-Systems noch besser auszuschöpfen.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel der vorliegenden Arbeit, zur Verbesserung eines ACC-Systems in Spurwechselsituationen auf Autobahnen ein nutzerzentriertes, situationsadaptives Fahrermodell zu entwickeln, wurde erreicht. Dazu wurden die Fahrerassistenzsysteme ACC, LKA und LCA vernetzt.

Im ersten Schritt wurde ein Realfahrversuch im öffentlichen Straßenverkehr durchgeführt, in dem abhängig vom Fahrstil anhand subjektiver und objektiver Kriterien Fahrerverhaltensänderungen in Spurwechselsituationen zwischen Fahrten mit dem Serien-ACC und Fahrten ohne ACC nachgewiesen wurden. Der Fragebogen ergab eine statistisch signifikante, niedrige Akzeptanz des Serien-ACC-Systems in Spurwechselsituationen. Darüber hinaus waren in der Auswertung der objektiven Messdaten, abhängig vom Fahrstil, deutliche Änderungen des Fahrerverhaltens in Spurwechselsituationen erkennbar. Insbesondere war ein vermehrtes Fahren auf der linken Spur und eine Abnahme der Gesamtanzahl von Spurwechseln während der Messfahrt mit ACC im Vergleich zur Fahrt ohne ACC festzustellen. Daneben wurde aus der Verteilung aller Spurwechsel auf Spurwechselklassen sowie aus einem mit ACC gestiegenen Ausscherabstand und einer gesunkenen Ausscherdifferenz deutlich, dass Fahrer mit einem ACC-System, das dem heutigen Stand der Technik entspricht, bewusst Kompensationshandlungen vornehmen, um die Schwächen des Systems mit ihrem natürlichen Fahrverhalten zu vereinen. Anhand der erhöhten Anzahl von komfortrelevanten Bremsungen  $>1,5 \text{ m/s}^2$  wurde ferner deutlich, dass in der komplexen Fahrsituation Spurwechsel die Situationsantizipation eines heutigen ACC-Systems weit von derjenigen des Menschen entfernt ist.

Mit dem Gedanken, das ACC-System mit weiteren Fahrerassistenzsystemen, vor allem dem LKA- und LCA-System, zu vernetzen, wurde dann ein Fahrermodell entwickelt, mit dem nun anstehende Spurwechsel frühzeitig und mit hoher Sicherheit vorausgesagt werden können. In dieser Spurwechselunterstützungsfunktion (SWU) wurden dezidiert sowohl der Fahrerwunsch für einen Spurwechsel ausgewertet als auch Sicherheits- und Komfortaspekte, zum Beispiel ob und wann ein Spurwechsel begonnen wird und wie dieser verlaufen wird. Eine hohe Reliabilität dieses Fahrermodells wurde erreicht durch eine Parametrierung anhand der Auswertung der Fahrdaten aus der Probandenstudie sowie der Nachbildung natürlicher Wahrnehmungs-, Entscheidungs- und Handlungsprozesse durch Methoden der Fuzzy-Logik. Dieses Fahrermodell wurde dann in das bestehende Serien-ACC über ein dafür entwickeltes Bypassingverfahren integriert und im Messfahrzeug umfassend getestet.

In einem zweiten Fahrversuch im realen Straßenverkehr wurde dann unter identischen Rahmenbedingungen mit neuen Probanden dieses Fahrermodell validiert und in seinen Parametern bestätigt. Die Rückbildung negativer Verhaltensänderungen, wie sie noch mit dem Serien-ACC aufgetreten waren, ließ sich eindeutig feststellen. Das jetzt ermittelte Fahrverhalten mit dem ACC/SWU-System kann als viel harmonischer und als dem Normalverhalten angenähert beschrieben werden. Zwischen der Messfahrt mit und ohne ACC/SWU konnten in den wesentlichen Parametern – wie der Spurwechselanzahl, dem Ausscherabstand, der Ausscherdifferenzgeschwindigkeit, der Verteilung der

Spurwechselklassen – keine signifikanten Unterschiede mehr festgestellt werden. Eine Angleichung an das Normalverhalten wurde deutlich. Daneben zeigte die Auswertung des Fragebogens eine verbesserte Systemtransparenz und Akzeptanz in der subjektiven Bewertung der Probanden. Für die objektive Bewertung der Qualität der Funktion SWU wurde eine Leistungsanalysefunktion entwickelt, in der durch objektive Gütemaße, wie z.B. das Verhältnis von berechtigten Auslösungen zu Fehlauflösungen, die stark verbesserte Unterstützung in Spurwechselsituationen erkennbar wurde.

Mit dem in dieser Arbeit vorgestellten Fahrermodell lässt sich also nachweisen, dass durch eine konsequente Vernetzung der Fahrerassistenzsysteme ACC, LKA und LCA ein situationsadaptives, fahrerzentriertes Handeln des ACC-Systems möglich ist.

Dieser zielführende Ansatz der Vernetzung sollte künftig nicht nur, wie in dieser Arbeit umgesetzt, für das ACC-System angewendet werden. Auch die Systeme LKA und LCA werden von der verbesserten gemeinsamen Situationsrepräsentation in großem Maße profitieren. Insgesamt ist zu hoffen, dass sich im rasant weiterentwickelnden Feld der Fahrerassistenz langfristig vernetzte Systeme durchsetzen. Im Idealfall wird dies ein ganzheitliches, integriertes Fahrerassistenz-Gesamtsystem sein. Denn nur durch die konsequente Nutzung des realen Fahrers als Vorbild und die Abbildung kognitiver Handlungsprozesse wird es langfristig möglich werden, ehrgeizige Visionen wie das unfallfreie Fahren oder Autopilotensysteme zur Komfortsteigerung zu erreichen.

# Anhang

## Anhang A: Statistik

Im Folgenden werden die statistischen Verfahren vorgestellt, die in der Auswertung der Probandenstudie und beim Aufbau des Fahrermodells verwendet wurden. Abhängig von der jeweiligen Fragestellung oder Hypothese dienen sie dazu, Zusammenhänge und Abhängigkeiten zwischen Variablen aufzuzeigen. Alle dargestellten Methoden zeigen nur einen Ausschnitt aus dem Wissensgebiet der Statistik. Weiterführende Informationen zur Statistik können der einschlägigen Literatur, zum Beispiel [Bortz 2005] oder [Backhaus 2006] entnommen werden.

### Signifikanzniveau

Vor der Auswertung aller Daten wurde das Signifikanzniveau für alle statistischen Tests auf 5% festgelegt. Das Signifikanzniveau muss immer in Abhängigkeit von der Stichprobengröße und der Datenquelle gewählt werden. Eine statistisch betrachtet kleinere Stichprobe und eine geringe Möglichkeit der Kontrollierbarkeit der Versuchsbedingungen erfordert eine Anhebung. Insbesondere bei Realfahrversuchen im öffentlichen Straßenverkehr können die Umgebungsbedingungen deutlich weniger kontrolliert werden als in Laborversuchen, so dass eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% akzeptiert werden muss. Daneben muss für die Auswahl des Signifikanzniveaus betrachtet werden, wie groß die Folgen einer Fehleinschätzung ausfallen. Bestehen direkte Gefahren für die Gesundheit oder das Leben von Menschen, müssen strengere Anforderungen an das Signifikanzniveau gestellt werden. Da dieser Umstand für diese Auswertung nicht gegeben ist, kann die Irrtumswahrscheinlichkeit, die direkt aus dem Signifikanzniveau 5% folgt, für die Fragestellungen dieser Arbeit akzeptiert werden.

### Korrelationen nach Spearman oder Pearson

Abhängig von den beteiligten Variablen für eine Korrelation wurde diese nach Pearson oder Spearman durchgeführt. Nach [Bortz 2005] kann die Korrelation nach Pearson immer dann angewendet werden, wenn es sich bei den Daten um metrisch skalierte Daten handelt. Aus diesem Grund werden alle Korrelationen zwischen Messwerten, wie z.B. die Fragestellung, ob eine Abhängigkeit des Lenkradwinkels von der Geschwindigkeit besteht, nach Pearson korreliert. Für Fragestellungen, bei denen eine oder beide Variablen rangskaliert sind, muss hingegen eine Korrelation nach Spearman angewendet werden (vgl. [Bortz 2005]). In dieser Arbeit sind dies alle Fragestellungen, bei denen Ergebnisse aus dem Fragebogen Teil einer Korrelation sind, z.B. ob ein besseres Systemverständnis auch zu einer höheren Akzeptanz führt.

Für beide Korrelationsarten gilt, dass der Korrelationskoeffizient ( $r$ ) angibt, ob ein linearer Zusammenhang zwischen zwei Variablen besteht und wie eng dieser ist. Der Wertebereich des Korrelationskoeffizienten liegt zwischen  $-1$  und  $1$ , was einem umgekehrt proportionalen bzw. einem direkt proportionalen Zusammenhang entspricht. Liegt der Wert nahe  $0$ , besteht kein funktionaler Zusammenhang. Der zugehörige Signifikanzkoeffizient ( $p$ ) gibt an, wie hoch die Wahrscheinlichkeit für den Irrtum ist, einen Zusammenhang zwischen zwei Variablen zu postulieren, obwohl dieser nicht besteht.

### Mehrfaktorielle Varianzanalysen

Die mehrfaktorielle Varianzanalyse wird verwendet, um den Einfluss mehrerer unabhängiger Variablen auf eine abhängige Variable zu untersuchen. In dieser Arbeit wurden Varianzanalysen hauptsächlich in den Auswertungen der Messdaten eingesetzt. Beispielsweise wurde diese Methode angewendet für die Fragestellung, ob systematische Unterschiede für den Ausscherabstand (abhängige Variable) zwischen den Fahrten mit und ohne ACC (unabhängige Variable) bestehen. Direkt aus der Analyse folgt dann der zugehörige Signifikanzkoeffizient ( $p$ ). Dieser gibt an mit welcher Wahrscheinlichkeit die Annahme falsch ist, dass sich die abhängige Variable zwischen den Gruppen der unabhängigen Variablen unterscheidet.

Handelt es sich bei der unabhängigen Variable um eine Größe, die mehr als zwei Stufen annehmen kann, z.B. der Fahrstil (sportlich, medium, komfortabel), ist ein Post-Hoc Test erforderlich, um festzulegen, welche Stufe den Einfluss auf die abhängige Variable hat. In dieser Arbeit wird hierfür der Bonferroni Post-Hoc Test durchgängig verwendet. Durch paarweise Vergleiche der Stufen zu einander kann so z.B. eine statistische Aussage zur Fragestellung, ob sich sportliche Fahrer in ihrem Ausscherabstand von komfortablen Fahrern unterscheiden, getroffen werden. Erneut geben die entsprechenden Signifikanzkoeffizienten ( $p$ ) der paarweisen Vergleiche an, welche Stufen zu einander signifikant unterschiedlich sind.

### T-Test:

Der T-Test für zwei unabhängige Stichproben gibt an, ob sich die beiden Stichproben hinsichtlich der abhängigen Variable unterscheiden. Beispielsweise bei der Auswertung des Fragebogens kann so die Frage beantwortet werden, ob Fahrer die frühe Bremsenengriffe des ACC in Spurwechselsituationen als störend bewerten, im Vergleich zu Fahrern, die sich nicht gestört fühlen, auch ihr Überholverhalten als verändert empfinden. Der Signifikanzkoeffizient ( $p$ ) gibt auch hier an, mit welcher Wahrscheinlichkeit irrtümlicherweise ein signifikanter Unterschied angenommen wird.

### Chi<sup>2</sup>-Test:

Mit dem Chi<sup>2</sup>-Test können Verteilungseigenschaften einer statistischen Grundgesamtheit untersucht werden. Hierbei werden Merkmale, die in vielen Ausprägungen auftreten, sinnvoll zu Klassen zusammengefasst. Beispielsweise kann mit dieser Testmethode die Frage

beantwortet werden, ob sich die Nutzertransparenz des ACC-Systems für die Probanden in den Fahrstudien von 2005 und 2006 signifikant unterscheidet. Explizit kann so geprüft werden, ob sich die Anzahl von Personen, die im ersten Fahrversuch eine hohe Nutzertransparenz äußern, signifikant von der Anzahl derer unterscheidet, die dies im zweiten Fahrversuch erklärt haben. Der Signifikanzkoeffizient ( $p$ ) gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit irrtümlicherweise ein signifikanter Unterschied angenommen wird.

#### Clusteranalyse:

Die Zielsetzung einer Clusteranalyse besteht darin, aus der Menge aller Daten (hier alle Probanden) Gruppen mit gleichen Merkmalen (hier Fahrstile) zusammenzufassen. Innerhalb einer homogenen Gruppe sollen die Mitglieder eine weitestgehend verwandte Eigenschaftsstruktur aufweisen. Daneben sollen zwischen den Gruppen in den analysierten Fragestellungen so gut wie keine Ähnlichkeiten bestehen (vgl. [Backhaus 2006]). Zur Einteilung der Probanden in Fahrstile wurden im ersten Schritt Merkmale mit Hilfe von Korrelationsanalysen identifiziert, die eine Trennung in verschiedene Fahrstile ermöglichen. Im nächsten Schritt wurden dann die Probanden hinsichtlich der gewählten Merkmale analysiert. Für eine Aussage über die Ähnlichkeit von Objekten einer Gruppe zueinander oder zwischen Gruppen werden sogenannte Proximitätsmaße verwendet. Bei metrischen Daten, wie den Messdaten, werden hierbei die (euklidischen) Distanzen zwischen den einzelnen Objekten betrachtet. Geht diese Distanz für zwei Objekte bezüglich der untersuchten Merkmale gegen Null, so werden diese Objekte als sehr ähnlich bezeichnet (vgl. [Backhaus 2006]). Im nächsten Schritt der Clusteranalyse müssen entsprechend der ermittelten Distanzen Gruppen zusammengefasst werden, in denen die Objekte eine hohe Übereinstimmung hinsichtlich der untersuchten Merkmale zeigen. Bei der Festlegung der geeigneten Clusterzahl besteht immer ein Zielkonflikt zwischen der Handhabbarkeit (kleine Clusterzahl) und der Homogenitätsforderung (große Clusterzahl). Speziell für den Fahrstil zeigte eine Einteilung in drei verschiedene Stufen (sportlich, moderat, komfortabel) hier den besten Kompromiss.

## Anhang B: Fuzzy-Logik

Im Folgenden wird das grundsätzliche Prinzip der Fuzzy-Logik vorgestellt und gegenüber der klassischen Mengenlehre mit dualen Zugehörigkeitsfunktionen abgegrenzt. Fuzzy-Logik ist nach [Mikut et al. 1999] definiert als Teilgebiet der mehrwertigen Logik, das die Behandlung von logischen Aussagen mit Zugehörigkeitsgraden zwischen Null und Eins ermöglicht. Hierbei wird der gängige dreigeteilte Prozess aus Fuzzifizierung, Inferenz und Defuzzifizierung vorgestellt.

Die klassische zweiwertige Logik kennt nur zwei Zustände, wahr und falsch. Die wichtigsten Verknüpfungsarten sind in Tabelle 8.1 dargestellt.

<i>Operation</i>	<i>Bedeutung</i>	<i>Symbol</i>
Negation	Nicht	$\neg$
Konjunktion	Und	$\wedge$
Disjunktion	Oder	$\vee$
Äquivalenz	Genau - dann - wenn	$\Leftrightarrow$
Implikation	Wenn - dann	$\Rightarrow$

Tabelle 8.1: Verknüpfungsarten

Oft werden in der Booleschen Logik die Zustandswerte 0 für falsch und 1 für wahr verwendet. Über die Operatoren aus der Tabelle können Elemente miteinander verknüpft werden. Hierbei gilt, dass sich mit den drei grundlegenden Verknüpfungen Negation, Konjunktion und Disjunktion jede andere Verknüpfungsart bilden lässt.

### Mengenlehre

Bei einer klassischen, scharfen Menge  $M$  ist die Zugehörigkeit eines Objektes  $x$  eindeutig definiert: entweder ist  $x$  ein Teil der Menge  $M$  oder  $x$  ist kein Teil der Menge. Diese Zuordnung kann mit dem Zugehörigkeitsgrad  $\mu(x)$  ausgedrückt werden:

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & \text{falls } x \in M \\ 0 & \text{ansonsten} \end{cases} \quad (8.1)$$

Bei einer Fuzzy-Menge wird diese zweiwertige Logik auf das Einheitsintervall  $[0, 1]$  erweitert. Die grafische Darstellung (Bild 8.1) der Zugehörigkeitsfunktionen zeigt die Unterschiede zwischen klassischer Mengenlehre und Fuzzy-Logik. Die klassische (scharfe) Menge kann dabei als Spezialfall einer unscharfen Menge angesehen werden.

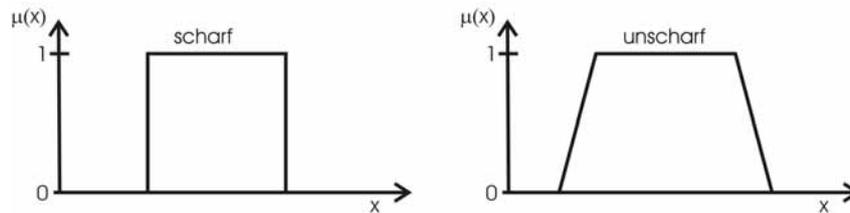


Bild 8.1: Scharfe und unscharfe Mengen

### Fuzzy-Mengen

Fuzzy-Mengen sind nach [Mikut et al. 1999] Mengen die aus geordneten Zahlenpaaren  $(x, \mu(x))$  bestehen, wobei  $x$  ein Element des im allgemeinen numerischen Grundbereiches und  $\mu(x)$  eine Zugehörigkeitsfunktion mit Werten aus dem Intervall  $[0,1]$  ist. Zur Veranschaulichung wird die Verwendung von Fuzzy-Mengen im Folgenden am Beispiel des menschlichen Temperaturempfindens vorgestellt. Der Mensch beschreibt physikalische Größen häufig durch linguistische Werte. Beispielsweise wird das Temperaturempfinden, die linguistische Variable, über die Adjektive (hier die linguistischen Werte) „eisig“, „kalt“, „angenehm“, „warm“ und „heiß“ beschrieben. Nach [Mikut et al. 1999] sind linguistische Werte natürlichsprachliche Bezeichnungen, um Eigenschaften einer Größe zu charakterisieren. Die gegenseitige Zuordnung zwischen numerischen Werten und linguistischen Werten erfolgt über Fuzzy-Mengen. Ein Element, im Beispiel eine bestimmte Temperatur, kann mehreren Mengen zu unterschiedlichen Graden angehören. Die Abbildung von unscharfen Zugehörigkeitsfunktionen über Trapeze ist hierbei eine gängige Methode innerhalb der Fuzzy-Logik. Grundsätzlich können auch andere Zugehörigkeitsfunktionen, wie in Bild 8.2 dargestellt, verwendet werden. Das Singleton, das genau einen scharfen Wert repräsentiert, stellt einen Sonderfall innerhalb der Zugehörigkeitsfunktionen dar.

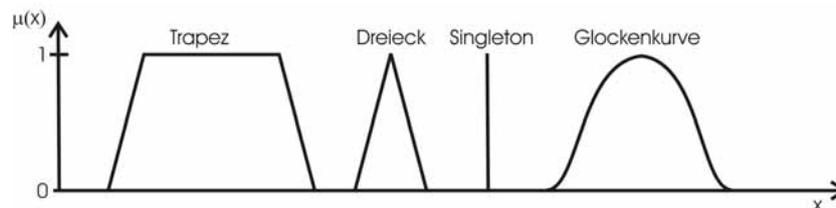


Bild 8.2: Zugehörigkeitsfunktion in der Fuzzy-Logik

Dreieck und Trapez werden am häufigsten verwendet, da sie sich mit wenigen Parametern eindeutig beschreiben lassen und bei der Verknüpfung verschiedener Fuzzy-Mengen der Rechenaufwand überschaubar bleibt [Heinsohn et al. 1999]. Die allgemeine mathematische Definition einer unscharfen Menge ist in Formel 8.2 dargestellt.

$$A = \left\{ (x, \mu_A(x)) \mid x \in X, \mu_A(x) \in [0,1] \right\} \quad (8.2)$$

## Operatoren der Fuzzy-Logik

Die Mengenoperatoren, die innerhalb der Fuzzy-Logik zur Verfügung stehen, stellen eine Verallgemeinerung der klassischen Mengenlehre dar. Für die Werte Null und Eins sollen diese Fuzzy-Operatoren dieselben Resultate wie die klassischen Operatoren liefern [Bertram et al. 1994]. Durchschnitt, Vereinigung und Komplement werden in der Fuzzy-Logik formuliert mit den Funktionsklassen T-Norm, S-Norm (häufig auch t-Conorm) und Negation. Eine T-Norm ist eine mathematische Funktion, die einen Durchschnittsoperator (= UND-Verknüpfung) für Fuzzy-Mengen darstellt, wenn sie bestimmte Minimalanforderungen erfüllt. Ein Vereinigungsoperator (= ODER-Verknüpfung) für unscharfe Mengen wird mit der S-Norm festgelegt. Auch hier müssen Minimalanforderungen eingehalten werden. Die erforderlichen Eigenschaften sind in Tabelle 8.2 zusammengefasst. Operationen auf unscharfen Mengen werden hierbei immer durch ihre Zugehörigkeitsfunktionen (Variablen  $x$ ,  $y$ ) definiert.

	<i>T-Norm</i>	<i>S-Norm</i>
Definitionsbereich	$0 \leq (x,y) \leq 1$	$0 \leq (x,y) \leq 1$
Wertebereich	$0 \leq T[x,y] \leq 1$	$0 \leq S[x,y] \leq 1$
Kommutivität	$T[x,y] = T[y,x]$	$S[x,y] = S[y,x]$
Assoziativität	$T[T[x,y], z] = T[x, T[y,z]]$	$S[S[x,y], z] = S[x, S[y,z]]$
Monotonie für $x \leq u$ bzw. $y \leq v$	$T[x,y] \leq T[u,v]$	$S[x,y] \leq S[u,v]$
Neutralement	$T[1,y] = y$	$S[0,y] = y$
Null- / Allement	$T[0,y] = 0$	$S[1,y] = 1$

Tabelle 8.2: Eigenschaften der T-Norm bzw. S-Norm

Es ergeben sich immer ergänzende Operatorpaare aus den T- und S-Normen. Einige dieser dualen Operatoren sind in Tabelle 8.3 aufgelistet [Börcsök 2000].

	<i>UND: T [x,y]</i>	<i>ODER: S [x,y]</i>
Minimum / Maximum	$T[x,y] = \min[x,y]$	$S[x,y] = \max[x,y]$
Algebraisches Produkt / Summe	$T[x,y] = x \cdot y$	$S[x,y] = 1 - [1 - x][1 - y]$
Begrenzte Differenz / Summe	$T[x,y] = \max[0, x + y - 1]$	$S[x,y] = \min[1, x + y]$

Tabelle 8.3: Weitere Operatoren der Fuzzy-Logik

Die Komplementmenge einer Fuzzy-Menge stellt wieder eine Verallgemeinerung der klassischen Negation dar. Es gilt:

$$\bar{\mu}(x) = 1 - \mu(x) \quad (8.3)$$

Mit Hilfe der De Morgan'schen Gesetze der Booleschen Logik lässt sich der Zusammenhang der UND- und ODER-Operatoren der Fuzzy-Logik (bzw. die Paare der einander zugeordneten T- und S-Normen) verstehen:

$$T[x,y] = \overline{S[x,y]} = 1 - S[1-x, 1-y] \quad (8.4)$$

$$S[x, y] = \overline{T[x, y]} = 1 - T[1 - x, 1 - y] \quad (8.5)$$

## Fuzzy-Systeme

Ein Fuzzy-System ist nach [Mikut et al. 1999] ein System, das linguistische Regeln verwendet und mit Hilfe der Teilblöcke Fuzzifizierung, Inferenz und Defuzzifizierung numerische Eingangsgrößen in numerische Ausgangsgrößen abbildet.

**Fuzzifizierung:** Umwandlung einer numerischen Größe in Zugehörigkeitsgrade zu linguistischen Werten einer linguistischen Variablen [Mikut et al. 1999].

**Inferenz:** Auswertung der Regelbasis, wodurch aus fuzzifizierten Eingangsgrößen eine Fuzzy-Menge der Ausgangsgrößen erzeugt wird. Die Teilschritte der Inferenz sind die Aggregation, die Aktivierung und die Akkumulation [Mikut et al. 1999].

**Defuzzifizierung:** Umwandlung einer Fuzzy-Menge in eine numerische Ausgangsgröße [Mikut et al. 1999].

Im Folgenden werden die drei Hauptteile eines Fuzzy-Logik Systems detaillierter erklärt.

## Fuzzifizierung

Bei der Fuzzifizierung werden die Wahrheitswerte aller linguistischer Aussagen, die die Eingangsgrößen eines Fuzzy-Systems betreffen, bestimmt. Hierzu wird jedem scharfen Wert mit Hilfe der jeweiligen Zugehörigkeitsfunktion für jeden linguistischen Wert ein Zugehörigkeitsgrad zugeordnet. Diese Zugehörigkeitsgrade quantifizieren in welchem Maße die linguistischen Aussagen einer linguistischen Variable erfüllt sind (vgl. [Bertram et al. 1994]). Diese Zuordnung wird beispielhaft in Bild 8.3 gezeigt.

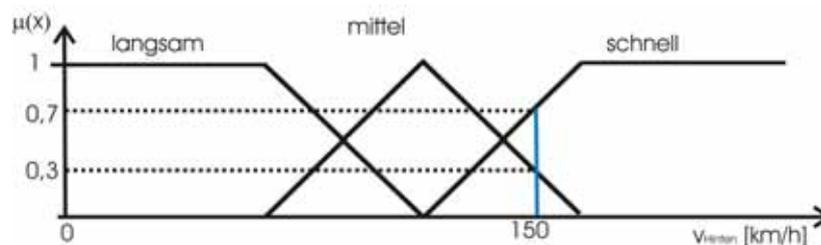


Bild 8.3: Beispiel einer Fuzzifizierung

Direkt aus den Erfüllungsgraden der Zugehörigkeitsfunktionen erhält man als Ergebnis der Fuzzifizierung in diesem Beispiel die drei Zugehörigkeitsgrade:

$$\mu_{\text{langsam}}(150) = 0, \quad \mu_{\text{mittel}}(150) = 0,3, \quad \mu_{\text{schnell}}(150) = 0,7 \quad (8.6)$$

Häufig sind die Zugehörigkeitsfunktionen der Fuzzy-Mengen so definiert, dass die Summe der berechneten Zugehörigkeitsgrade für einen scharfen Eingangswert 1 ergibt. Die Zahl der linguistischen Werte richtet sich danach, wie differenziert die Betrachtung einer Eingangsgröße nötig ist. Häufig werden die Randbereiche der linguistischen Variablen über offene Mengen (hier: Trapeze) beschrieben. Somit ist sichergestellt, dass die Fuzzifizierung zu jedem Eingangswert eine Zuordnung zu einem linguistischen Wert vornimmt und Schlussfolgerungen möglich werden. Soll ein Fuzzy-System sensitiv auf kleine Änderungen der Eingangsgröße reagieren, ist für diesen Bereich eine schmale Menge (= steile Flanke) zu wählen (vgl. [Tilli 1992]).

### Inferenz

Mit den fuzzyfizierten Eingangsgrößen wird die Regelbasis durchlaufen. Die Regeln liegen in folgender Form vor:

**WENN** <PRÄMISSE>, **DANN** <KONKLUSION>

Die Prämisse, die auch aus mehreren Teilbedingungen bestehen kann, wird in der Literatur als linke Seite der Regel bezeichnet. Die Konklusion bzw. die Schlussfolgerung stellt die rechte Seite dar. Üblicherweise werden die Schlussfolgerungen durch linguistische Werte beschrieben, die über entsprechende Fuzzy-Mengen Mengen abgebildet werden. Die Auswertung der Regeln erfolgt in der Fuzzy-Logik „von links nach rechts“, was als Vorwärtsschließen bezeichnet wird, während z.B. bei Expertensystemen auch das Rückwärtsschließen eingesetzt wird.

### Implikation

In der Literatur sind für die Fuzzy-Implikation, auch fuzzylogisches Schließen genannt, verschiedenste Ansätze entwickelt worden. Tabelle 8.4 zeigt gängige Verfahren der Implikation.

<i>Implikation</i>	<i>mathematisches Modell</i>
<b>Mamdani</b>	$\mu_{A \Rightarrow B}(x) = \min [\mu_A(x), \mu_B(x)]$
<b>Larsen</b>	$\mu_{A \Rightarrow B}(x) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x)$
<b>Zadeh</b>	$\mu_{A \Rightarrow B}(x) = \max [\min[\mu_A(x), \mu_B(x)], 1 - \mu_A(x)]$
<b>Lukasiewicz</b>	$\mu_{A \Rightarrow B}(x) = \min [1, 1 - \mu_A(x) + \mu_B(x)]$
<b>Gödel</b>	$\mu_{A \Rightarrow B}(x) = \begin{cases} 1 & \text{falls } \mu_A(x) < \mu_B(x) \\ \mu_B(x) & \text{sonst} \end{cases}$

Tabelle 8.4: Methoden der Implikation in der Fuzzy-Logik

Die bekannteste und meist verwendete Variante ist die Mamdani-Implikation [Bote 1993], [Börcsök 2000]. Diese geht von dem Grundgedanken aus, dass der Wahrheitsgehalt der Konklusion nicht größer sein sollte als der Wahrheitsgehalt der Prämisse. Es gilt:

$$\mu_{A \Rightarrow B}(x) = \min \left[ \mu_A(x), \mu_B(x) \right] \quad (8.7)$$

Ein weiteres, oft verwendetes Verfahren ist die Larsen-Implikation, die auch als Algebraisches Produkt bezeichnet wird:

$$\mu_{A \Rightarrow B}(x) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) \quad (8.8)$$

Wie sich das Ergebnis dieser beiden Implikationen interpretieren lässt, soll an einem Beispiel gezeigt werden (vgl. Bild 8.4). In diesem Beispiel gilt die Regel „Wenn x= hoch, Dann y= wenig.“

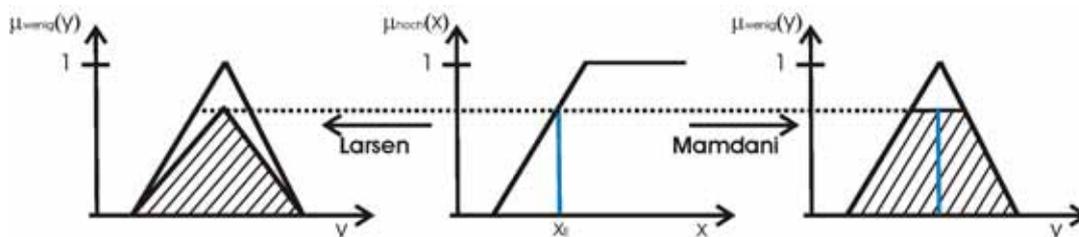


Bild 8.4: Vergleich von Mamdani und Larsen Implikation

Bei der Mamdani-Implikation wird die Ausgangs-Fuzzy-Menge oberhalb ihres Erfüllungsgrades abgeschnitten. Dagegen wird beim Algebraischen Produkt ihre ganze Form verkleinert, d.h. die Ausgangsmenge wird in der Höhe zusammengestaucht, behält aber ihre Form. Durch die Formänderung bei Mamdani geht Information verloren. Der Einfluss des Implikations-Operators auf das Fuzzy-System ist allerdings nur schwer einzuschätzen und wird in der Literatur wenig beachtet. Überwiegend wird die Mamdani-Implikation eingesetzt, so dass dieses Verfahren der Implikation auch für die Modellierung der Spurwechselunterstützung verwendet wurde.

Die Inferenz wie sie in der Funktion Spurwechselunterstützung eingesetzt wurde, lässt sich in drei Schritte unterteilen:

- **Aggregation:** Bestimmung des Zugehörigkeitsgrades der Prämisse einer linguistischen Regel durch Verknüpfung der Zugehörigkeitsgrade aller linguistischer Teilprämissen mittels Fuzzy-Operatoren [Mikut et al. 1999].
- **Aktivierung:** Bestimmung des Zugehörigkeitsgrades der Konklusion einer linguistischen Regel aus dem Zugehörigkeitsgrad der Prämisse und einem eventuell vorhandenen Wichtungsfaktor [Mikut et al. 1999].
- **Akkumulation:** Zusammenfassen der Zugehörigkeitsgrade der Konklusionen aller linguistischen Regeln zu einer Fuzzy-Menge der Ausgangsgröße [Mikut et al. 1999].

### Aggregation

Im ersten Teilschritt werden die Vorbedingungen jeder Regel ausgewertet. Das Ergebnis wird als Erfüllungsgrad (H) bezeichnet. Besteht die Prämisse nur aus einer Bedingung, so ist der Erfüllungsgrad der Prämisse gleich dem Zugehörigkeitsgrad des aktuellen scharfen Eingangswertes zur Fuzzy-Menge. Regeln mit einem Erfüllungsgrad  $H > 0$  werden als aktiv bezeichnet. Besteht die Prämisse aus mehreren Teilbedingungen, so müssen diese miteinander verknüpft werden. Hierfür stehen die Operatoren der T- und S-Norm zur Verfügung. Hauptsächlich werden nur UND-Verknüpfungen benötigt, da mit jeder Teilprämisse, die ODER verknüpft ist, eine eigene Regel erstellt werden kann. Der Einfluss des Aggregationsoperators ist allerdings nach [Tilli 1992] und [Michels et al. 2002] nur gering.

### Aktivierung:

Unter Aktivierung versteht man im Kontext der Fuzzy-Logik die Art und Weise der Auswertung der Zugehörigkeitsfunktionen der Schlußfolgerungen entsprechend dem Wahrheitswert der Prämissen [Bertram et al. 1994].

### Akkumulation

Die Zusammenfassung der Ergebnisse der einzelnen Regeln zu einem Gesamtergebnis wird als Akkumulation bezeichnet. Betreffen mehrere Regeln eine Ausgangs Fuzzy-Menge, so ist ein Vereinigungsoperator (ODER - Verknüpfung) anzuwenden. Am häufigsten wird der „MAX-Operator“ verwendet, der nur das Maximum der Teilergebnisse berücksichtigt. Bei Fragestellungen, in denen alle Regeln, die diese Menge als Schlussfolgerung haben, herangezogen werden sollen, kann alternativ der Operator „begrenzte Summe (Bounded-Sum)“ verwendet werden (siehe Tabelle 8.3). Ist für jede Ausgangsmenge ein Ergebniswert ermittelt worden, liegt das Inferenzergebnis vor.

### Defuzzifizierung

Aus der resultierenden Fuzzy-Menge der Inferenz wird in der Defuzzifizierung eine scharfe Ausgangsgröße ermittelt. Analog der Fuzzifizierung stehen erneut verschiedene Methoden zur Verfügung. Häufig verwendete Methoden sind die Maximum-Methode, die Maximum-Mittelwert-Methode und die (erweiterte) Schwerpunktmethode.

Bei der Maximum-Methode wird nur die Regel mit dem höchsten Erfüllungsgrad berücksichtigt. Neben der Methode des einfachen Maximums existiert auch die Maximum-Mittelwert-Methode, die einen Mittelwert aus mehreren Maxima bildet. Mittelungsmethoden, die das gesamte Inferenzergebnis bzw. alle aktiven Regeln einbeziehen, werden am meisten verwendet. Häufig eingesetzt wird die Methode des Flächenschwerpunkts, die als scharfen Ausgangswert den Abszissenwert des Flächenschwerpunktes der Ergebnismenge hat. Bild 8.5 zeigt beispielhaft dieses Verfahren.

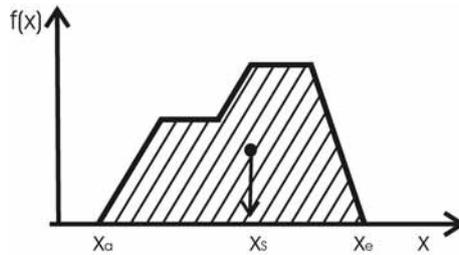


Bild 8.5: Berechnung des Flächenschwerpunkts

Ist  $f(x)$  die Funktion der Berandungsfläche, so wird der Abszissenwert  $x_s$  des Flächenschwerpunktes nach Formel (8.9) berechnet.

$$x_s = \frac{\int_{x_a}^{x_e} x \cdot f(x) \, dx}{\int_{x_a}^{x_e} f(x) \, dx} \quad (8.9)$$

Soll der scharfe Ausgangswert einen bestimmten Wertebereich besitzen, so ist darauf zu achten, dass die Fuzzy-Mengen, die die Randbereiche abdecken, symmetrisch über die Intervallgrenzen fortgesetzt werden. Nur so kann der Ausgangswert den Minimal- bzw. Maximalwert seines vorgesehenen Wertebereichs erreichen. Oft werden auch Singletons als Ausgangsmengen verwendet. Dies vereinfacht die Berechnung des Flächenschwerpunkts erheblich und stellt nach [Börcsök 2000] eine ausreichende Näherung dar, da die Breite der Ausgangsmengen vernachlässigbar ist (vgl. [Tilli 1992]). Mit dem Wahrheitsgehalt  $\mu_i$  und der  $x$ -Koordinate  $x_i$  jedes Singletons kann der Ausgangswert  $x_a$  berechnet werden:

$$x_a = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot \mu_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i} \quad (8.10)$$

Insgesamt stellt der im Anhang zusammengetragene kurze Überblick nur einen kleinen Ausschnitt der Fuzzy-Logik dar. Im Speziellen wurden alle Methoden vorgestellt, die direkt im nutzerzentrierten Fahrermodell für das situationsadaptive ACC/SWU eingesetzt worden sind.

## Anhang C: Dokumente aus den Fahrstudien

Projekt ACC/SWU

Bedienungsanleitung ACC



Institut für Arbeitswissenschaft der  
Universität der Bundeswehr München  
& AUDI AG Ingolstadt

Projekt ACC/SWU



### ACC-Bedienungsanleitung

Das Fahrerassistenzsystem ACC (adaptive cruise control) ist eine Kombination aus Geschwindigkeits- und Abstandsregelanlage:

- Sie stellen eine Wunschgeschwindigkeit ein;
- wenn die Straße frei ist, hält ACC diese Geschwindigkeit konstant (wie ein Tempomat);
- befindet sich ein langsames Fahrzeug vor Ihnen, wird dieses Fahrzeug mit dem Radarsensor erkannt; ACC geht vom Gas bzw. bremst und stellt so automatisch den Sicherheitsabstand zum Vorderfahrzeug ein;
- ist die Strecke wieder frei, beschleunigt ACC wieder auf Ihre Wunschgeschwindigkeit.

#### ACC einschalten



Um ACC einzuschalten, ziehen Sie den Bedienhebel am Lenkrad zu sich (Position 1 in der Abbildung links).

Drücken Sie nun die SET-Taste (Pfeil in der Abbildung rechts), um die aktuelle Geschwindigkeit als Wunschgeschwindigkeit einzustellen.



Nehmen Sie den Fuß vom Gaspedal, denn ACC reguliert Geschwindigkeit und Abstand jetzt für Sie.

#### ACC-Wunschgeschwindigkeit verändern



Sie können die Wunschgeschwindigkeit erhöhen, indem Sie den Bedienhebel nach oben drücken (+), und verringern, indem Sie ihn nach unten bewegen (-).

Wenn Sie den Bedienhebel kurz drücken, verändert sich die Wunschgeschwindigkeit jeweils um einen Skalenstrich im Tacho. Halten Sie den Hebel gedrückt, wird die Geschwindigkeit fortlaufend erhöht bzw. erniedrigt.

#### ACC ausschalten

Um ACC abzuschalten, treten Sie auf das Bremspedal. Ihre Wunschgeschwindigkeit wird im Speicher behalten. Sie können ACC mit dieser Wunschgeschwindigkeit wieder aktivieren, indem Sie den Bedienhebel zu sich ziehen.

#### ACC übertreten

Mit dem Gaspedal „übertreten“ Sie ACC – Sie steuern Geschwindigkeit und Abstand wieder selbst. Wenn Sie vom Gas gehen, übernimmt ACC wieder die Kontrolle und bringt Sie zurück auf Ihre Wunschgeschwindigkeit bzw. auf den Sicherheitsabstand (anders als beim Bremspedal, nach dessen Betätigung Sie ACC erst wieder aktivieren müssen).

### Übernahmeaufforderung

ACC bremst nicht mit der maximalen Fahrzeugverzögerung, sondern nur bis zu einer bestimmten Grenze. Wenn dies nicht ausreicht, um einen sicheren Abstand zum Vorderfahrzeug zu wahren, erhalten Sie eine Übernahmeaufforderung. Ein Warnton sowie verschiedene Anzeigen (siehe unten) weisen Sie darauf hin, dass Sie selbst bremsen müssen.

### ACC-Anzeigen



Die ACC-Anzeigen befinden sich im Tachometer (A) und im Display (B). Vorübergehende Informationen werden in der Infozeile (C) angezeigt.

Im **Tachometer** ist der Leuchtdiodenkranz über allen möglichen Geschwindigkeiten schwach beleuchtet, wenn ACC eingeschaltet ist (vgl. Abbildung rechts).

Die Wunschgeschwindigkeit wird durch eine dunkelrot markierte Leuchtdiode angezeigt. Wenn die gewählte Wunschgeschwindigkeit genau zwischen zwei Geschwindigkeiten liegt, sind beide hervorgehoben.



Im **Display** sehen Sie eine schematische Abbildung des Vorderfahrzeugs. Wenn nur



Fahrzeugumrisse zu sehen sind (vgl. Abbildung links), erkennt ACC kein Vorderfahrzeug und fährt mit Ihrer Wunschgeschwindigkeit.

Ist das Fahrzeug grau ausgefüllt (vgl. Abbildung rechts), hat ACC ein Vorderfahrzeug registriert und reguliert den Abstand. Dies wird durch einen Zeiger symbolisiert, der bei sinkendem Abstand von rechts nach links wandert.



Befindet sich der Zeiger im grünen Bereich (vgl. Abbildung), wird der eingestellte Sicherheitsabstand gewahrt. Der rote Bereich zeigt eine Unterschreitung des Zielabstands an.



Bei Erreichen der äußersten, linken Zeigerposition erscheint eine *Übernahmeaufforderung*. Zusätzlich zum oben erwähnten Warnton wird die Übernahmeaufforderung durch ein rot ausgefülltes Fahrzeug im Display und durch die Warnmeldung „ABSTAND!“ angezeigt (vgl. Abbildung links).

Wenn Sie ACC durch Betätigung des Gaspedals übertreten, erscheint unterhalb des Fahrzeugbilds ein Hinweistext im Display (vgl. Abbildung links).



Wenn ACC ausgeschaltet ist oder wenn Sie keine Wunschgeschwindigkeit gesetzt haben, erscheint im Display anstelle des Fahrzeugbilds der Text „adaptive cruise control“, ggf. in Verbindung mit dem Hinweis „BEREIT“ oder „AUS“ (vgl. Abbildungen rechts).



In der **Infozeile** unterhalb der Abstandsanzeige werden wichtige Informationen vorübergehend angezeigt, so z.B. die Wunschgeschwindigkeit, wenn Sie diese ändern bzw. neu setzen (vgl. Abbildung rechts).

Weitere Funktionshinweise, die in der Infozeile erscheinen, wird Ihnen der Versuchsleiter bei Bedarf erläutern.



#### ACC-Systemgrenzen

ACC funktioniert nicht unter allen Bedingungen:

- Der ACC-Geschwindigkeitsbereich ist auf 30 bis 200 km/h beschränkt. Sobald die Geschwindigkeit unter 30 km/h fällt, sollten Sie das System manuell deaktivieren.
- Wie im Zusammenhang mit der *Übernahmeaufforderung* bereits erwähnt, müssen Sie in bestimmten Situationen selbst bremsen, weil es eine Obergrenze für die ACC-Verzögerung gibt.
- Die Reichweite des Radarsensors ist begrenzt, und bestimmte Situationen erkennt der Sensor nicht korrekt, so dass ACC entweder scheinbar grundlos bremsen oder auf ein vorhandenes Fahrzeug nicht reagiert.

Nicht zuletzt aufgrund dieser systembedingten Grenzen liegt die Verantwortung für Geschwindigkeit und Abstand stets bei Ihnen als Fahrer – bleiben Sie aufmerksam, und greifen Sie in die ACC-Steuerung ein, wenn es die Situation erfordert.



Projekt ACC/SWU		Fragebogen Teil 2						Proband Nr.
		Stimmt gar nicht	Stimmt meistens nicht	Stimmt eher nicht	Stimmt eher	Stimmt meistens	Stimmt absolut	In dieser Situation habe ich keine Unterstützung durch ACC erwartet.
1.	Das Verhalten des Fahrerassistenz-Systems ACC entspricht meiner gewohnten Fahrweise.							
2.	Die Trainingsphase war ausreichend, um sich an die Nutzung von ACC zu gewöhnen.							
3.	Ich konnte dem System ACC während der Fahrt vertrauen.							
4.	Beim <b>Überholen</b> entspricht das Verhalten von ACC meiner normalen Fahrweise.							
5.	Bei <b>Autobahn-Abfahrten</b> entspricht das Verhalten von ACC meiner normalen Fahrweise.							
6.	Beim Umgang mit <b>einfädelnden Fahrzeugen</b> im Bereich von <b>Autobahn-Auffahrten</b> entspricht das Verhalten von ACC meiner normalen Fahrweise.							
7.	Es ist gut, dass das ACC die Möglichkeit zum Spurwechsel berücksichtigt.							
8.	Es wäre vorteilhaft, wenn man über einen Hinweis die Empfehlung für den Spurwechsel bekommen würde.							
9.	Insgesamt fühlt sich die Abstandsregulierung durch das ACC sehr angenehm an.							

## 10. Die Reaktionen von ACC ...

..waren immer verständlich und vorhersehbar.	..waren meistens verständlich und vorhersehbar.	..waren in der Hälfte der Fälle verständlich und vorhersehbar	..waren meistens unverständlich und unvorhersehbar.	..waren unverständlich und unvorhersehbar.
--	---	---	---	--

## 11. Während der Fahrt mit ACC wurde ich durch das System...

..entlastet.	..etwas entlastet.	..nicht beeinträchtigt.	..etwas beansprucht.	..beansprucht..
--------------	--------------------	-------------------------	----------------------	-----------------

## 12. Während der Fahrt mit ACC war meine Fahrgeschwindigkeit im Durchschnitt...

..deutlich geringer als ohne ACC.	..etwas geringer als ohne ACC.	..genauso schnell wie ohne ACC.	..etwas höher als ohne ACC.	..deutlich höher als ohne ACC.
-----------------------------------	--------------------------------	---------------------------------	-----------------------------	--------------------------------

Darauf habe ich nicht geachtet.

## 13. Während der Fahrt mit ACC waren meine Abstände zum Vorderfahrzeug im Durchschnitt...

..deutlich kleiner als ohne ACC.	..etwas kleiner als ohne ACC.	..genauso groß wie ohne ACC.	..etwas größer als ohne ACC.	..deutlich größer als ohne ACC.
----------------------------------	-------------------------------	------------------------------	------------------------------	---------------------------------

Darauf habe ich nicht geachtet.

14. Mit ACC überhole ich...

..wesentlich häufiger als ohne ACC.	..etwas häufiger als ohne ACC.	..genauso oft wie ohne ACC.	..etwas seltener als ohne ACC.	..wesentlich seltener als ohne ACC.
-------------------------------------	--------------------------------	-----------------------------	--------------------------------	-------------------------------------

Darauf habe ich nicht geachtet.

15. Beim Überholen wechsle ich die Spur mit ACC...

..deutlich früher als ohne ACC.	..etwas früher als ohne ACC.	..zum gleichen Zeitpunkt wie ohne ACC.	..etwas später als ohne ACC.	..deutlich später als ohne ACC.
---------------------------------	------------------------------	--	------------------------------	---------------------------------

Darauf habe ich nicht geachtet.

16. Beim Überholen übertrete ich ACC mit dem Gaspedal...

..nie.	..ab und zu.	..in der Hälfte der Fälle	...häufig	..immer.
--------	--------------	---------------------------	-----------	----------

Darauf habe ich nicht geachtet.

17. Beim Abfahren von der Autobahn schalte ich ACC vor dem Erreichen des Verzögerungstreifens mit dem Bremspedal oder mit dem Bedienhebel aus.

..nie.	..ab und zu.	..in der Hälfte der Fälle	...häufig	..immer.
--------	--------------	---------------------------	-----------	----------

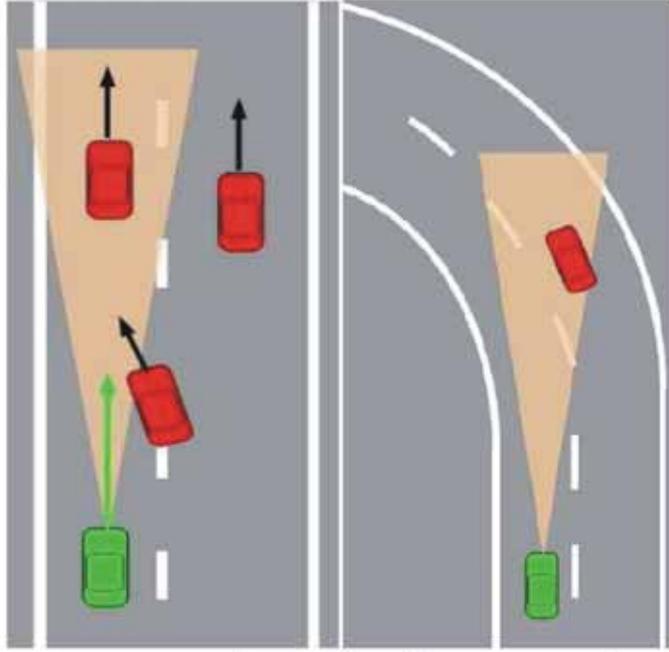
Darauf habe ich nicht geachtet.

18. ACC bietet eine "Überholhilfe": Beim Spurwechsel nach links wird verstärkt Gas gegeben, wenn der Fahrer blinkt. Diese Funktion ...  
 ..habe ich bemerkt.  
 ..ist mir nicht aufgefallen.

Zuletzt werden wir Ihnen einige Situationen beschreiben, die möglicherweise während der Fahrt mit ACC aufgetreten sind. Bitte geben Sie an, ob Sie diese erlebt haben und wenn ja, inwieweit Sie sie als störend empfinden.

**19. Nah-Einschoner:**

ACC reagiert nicht auf Naheinschoner, solange sich diese außerhalb des Sensor-Erkennungsbereichs befinden (vgl. Abbildung).



Dieser Fall ist während meiner ACC-Fahrt nicht aufgetreten.

Diesen Fall habe ich erlebt und ich finde es ...

sehr störend.	eher störend.	neutral.	eher nicht störend.	nicht störend.
---------------	---------------	----------	---------------------	----------------

**20. Nebenspur-Störung:**

ACC bremst in Kurven scheinbar ohne Grund, weil es fälschlicherweise auf Fahrzeuge in den Nebenfahrbahnen reagiert (vgl. Abbildung).

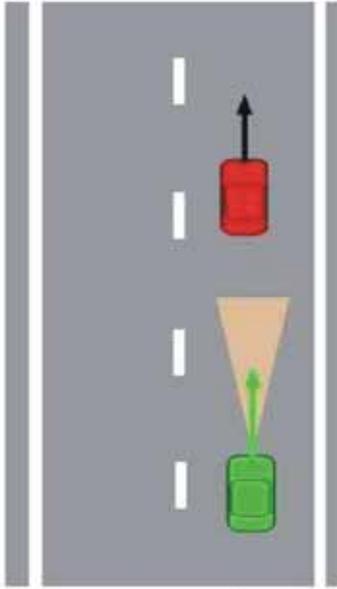
Dieser Fall ist während meiner ACC-Fahrt nicht aufgetreten.

Diesen Fall habe ich erlebt und ich finde es ...

sehr störend.	eher störend.	neutral.	eher nicht störend.	nicht störend.
---------------	---------------	----------	---------------------	----------------

**21. Zielobjekt-Verlust:**

Der ACC-Sensor erkennt das Vorderfahrzeug plötzlich nicht mehr, obwohl es sich unverändert vor dem eigenen Fahrzeug befindet (vgl. Abbildung).



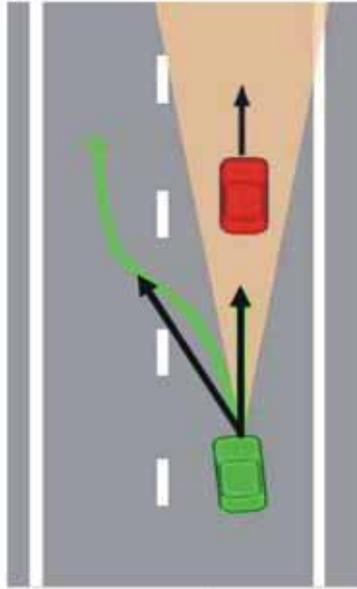
Dieser Fall ist während meiner ACC-Fahrt nicht aufgetreten.

Diesen Fall habe ich erlebt und ich finde es ...

sehr störend.	eher störend.	neutral.	eher nicht störend.	nicht störend.
---------------	---------------	----------	---------------------	----------------

**22. Erschwertes Überholen:**

Obwohl ein Überholvorgang möglich wäre, bremst ACC bei der Annäherung an ein langsameres Fahrzeug und verzögert dadurch das Überholen (vgl. Abbildung).



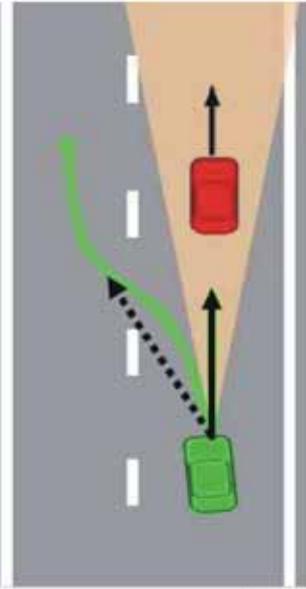
Dieser Fall ist während meiner ACC-Fahrt nicht aufgetreten.

Diesen Fall habe ich ca. ... mal erlebt und ich finde es ...

sehr störend.	eher störend.	neutral.	eher nicht störend.	nicht störend.
---------------	---------------	----------	---------------------	----------------

**23. Falsche Überholunterstützung:**

ACC berücksichtigt die Möglichkeit zu überholen. Überholt man nicht, führt dies zu einem späteren und kräftigerem Bremsen hinter dem Vorderfahrzeug (vgl. Abbildung).



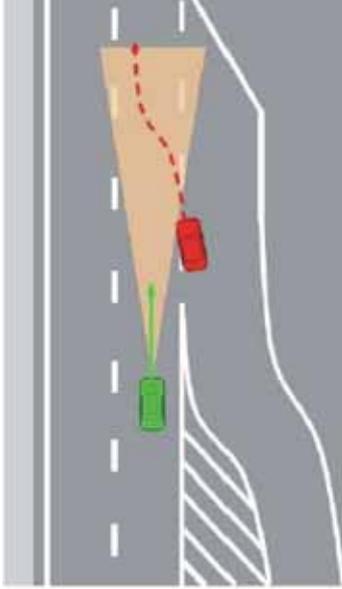
Dieser Fall ist während meiner ACC-Fahrt nicht aufgetreten.

Diesen Fall habe ich ca. ... mal erlebt und ich finde es ...

sehr störend.	eher störend.	neutral.	eher nicht störend.	nicht störend.
---------------	---------------	----------	---------------------	----------------

**24. Einfädler:**

Auf einfädelnde Fahrzeuge im Bereich von Autobahn-Auffahrten reagiert ACC nicht angemessen, weil es sie zu spät als Zielobjekte erkennt (vgl. Abbildung).



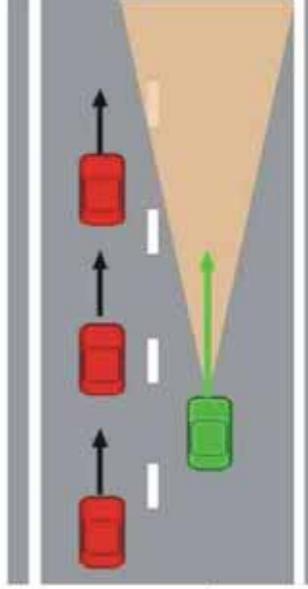
Dieser Fall ist während meiner ACC-Fahrt nicht aufgetreten.

Diesen Fall habe ich erlebt und ich finde es ...

sehr störend.	eher störend.	neutral.	eher nicht störend.	nicht störend.
---------------	---------------	----------	---------------------	----------------

**25. Rechts-Überholen:**

Mit ACC überholt man ungewollt andere Fahrzeuge rechts (vgl. Abbildung).



Dieser Fall ist während meiner ACC-Fahrt nicht aufgetreten.

Diesen Fall habe ich erlebt und ich finde es ...

sehr störend.	eher störend.	neutral.	eher nicht störend.	nicht störend.
---------------	---------------	----------	---------------------	----------------

26. Folgende Dinge haben mich an ACC gestört:

27. Ich habe folgende Verbesserungsvorschläge für ACC:

28. Folgende Situationen / besonderen Vorkommnisse sind mir noch in Erinnerung:

## Anhang D: Überblick zu verwendeten ACC-Studien

Studie	<i>Kovordányi, R.: When will Advanced Driver Support Systems be User-Adaptive? (2005)</i>
Eingesetzte Testmethode	Simulator fixed-base
ACC-System	ACC, max. Verzögerung $-3\text{m/s}^2$
Zahl der Probanden (m/w)	30 Probanden (k.A./k.A.) Altersverteilung: k.A.
Dauer des Tests	45 Minuten

Studie	<i>Ioannou, P. &amp; Stefanovic, M.: Evaluation of ACC Vehicles in Mixed Traffic: Lane Change Effects and Sensitivity Analysis. (2005)</i>
Eingesetzte Testmethode	Realfahrversuch, abgesperrtes Testgelände
ACC-System	ACC
Zahl der Probanden (m/w)	k.A.
Dauer des Tests	k.A.

Studie	<i>Didier, M. &amp; Landau, K.: Komfortbeurteilungen von ACC Systemen (Adaptive Cruise Control) mit Hilfe des Bremsverhaltens. (2005)</i>
Eingesetzte Testmethode	Realfahrversuch, abgesperrtes Testgelände
ACC-System	ACC
Zahl der Probanden (m/w)	36 Probanden (36/0), Altersverteilung: 36-70 Jahre, MW 51Jahre
Dauer des Tests	4 Messfahrten à 127 km

Studie	<i>Tricot, N., Rajaonah, B., Pacaux, M.-P., Popieul, J.: Driver's behaviors and Human-Machine interactions characterization for the design of an Advanced Driver Assistance System. (2004)</i>
Eingesetzte Testmethode	Simulator fixed-base
ACC-System	ACC/FSR, max. Verzögerung $-3\text{m/s}^2$
Zahl der Probanden (m/w)	45 Probanden (k.A./k.A.), Altersverteilung: 22-52 Jahre.
Dauer des Tests	2 kurze Trainingsphasen, Messfahrt 50 km

Studie	<i>Björkly, C.A., Jensen, G.D., Moen, T., Vaa, T.: Adaptive Cruise Control (ACC) and Driver Performance: Effects on Objective and Subjective Measures. (2003)</i>
Eingesetzte Testmethode	Simulator (Bewegungssystem k.A.)
ACC-System	ACC, max. Verzögerung $-3\text{m/s}^2$
Zahl der Probanden (m/w)	18 Probanden (k.A./k.A.), Altersverteilung: k.A.
Dauer des Tests	k.A.

Studie	<i>Törnros, J., Nilsson, L., Kircher, A.: Effects of ACC on driver behaviour, workload and acceptance in relation to minimum time headway. (2002)</i>
Eingesetzte Testmethode	Simulator moving-base
ACC-System	ACC, max. Verzögerung $-3\text{m/s}^2$
Zahl der Probanden (m/w)	24 Probanden (12/12), Altersverteilung: 23-55 Jahre, MW 40 Jahre
Dauer des Tests	20 km Trainingsfahrt, 4 Messfahrten je Proband

Studie	<i>Weinberger M.: Der Einfluss von Adaptive Cruise Control auf das Fahrerverhalten. (2001)</i>
Eingesetzte Testmethode	Alltagsfahrten, Messfahrzeug
ACC-System	ACC, max. Verzögerung $-2\text{m/s}^2$
Zahl der Probanden (m/w)	15 Probanden (15/0), Altersverteilung: 30-62 Jahre
Dauer des Tests	4 Wochen, durchschnittliche Fahrstrecke 1300 km/Woche, Alltagsnutzung

Studie	<i>Hoedemaeker, M. &amp; Kopf, M.: Visual sampling behaviour when driving with adaptive cruise control. (2001)</i>
Eingesetzte Testmethode	Realfahrten, Messfahrzeug
ACC-System	Variante 1: ACC, keine Verzögerung aktives Bremspedal Variante 2: ACC nur Motorschleppmoment $-0,5\text{m/s}^2$ Variante 3: ACC maximale Bremsverzögerung $1,5\text{m/s}^2$
Zahl der Probanden (m/w)	24 Probanden (24/0), Altersverteilung: 25-40 Jahre
Dauer des Tests	k.A.

Studie	<i>Hoedemaker, M.: Driving with Intelligent Vehicles Driving behaviour with ACC and the acceptance by individual drivers (2000)</i>
Eingesetzte Testmethode	Simulator (Bewegungssystem k.A.)
ACC-System	ACC
Zahl der Probanden (m/w)	k.A.
Dauer des Tests	k.A.

Studie	<i>Fancher, P., Ervin, R., Sayer J., Hagan, M., Bogard, S., Bareket, Z., Mefford, M., &amp; Haugen, J.: Intelligent cruise control field operation test. Final Report (1998)</i>
Eingesetzte Testmethode	Alltagsfahrten, Messfahrzeug
ACC-System	ACC ohne aktiven Bremseneingriff, max. Verzögerung: $-0,7\text{m/s}^2$
Zahl der Probanden (m/w)	108 Probanden, Alterszuordnung in drei Gruppen ( $> 60$ Jahre, $>40$ Jahre, $>20$ Jahre)
Dauer des Tests	2 bis 5 Wochen je Proband, Alltagsnutzung

Studie	<i>Hoedemaeker M., Brookhuis K.A.: Behavioural adaptation to driving with an adaptive cruise control (ACC). (1998)</i>
Eingesetzte Testmethode	Simulator fixed-base
ACC-System	ACC
Zahl der Probanden (m/w)	38 Probanden (25/13), Altersverteilung 25-60 Jahre
Dauer des Tests	k.A.

Studie	<i>Stanton, N.A.; Young, M.: Drive by Wire: the case of driver workload and reclaiming control with adaptive cruise control (1997)</i>
Eingesetzte Testmethode	Simulator fixed-base
ACC-System	ACC
Zahl der Probanden (m/w)	12 Probanden (6/6), Durchschnittsalter 21 Jahre
Dauer des Tests	k.A.

Studie	<i>Sayer, J. R., Mefford, M. L., Fancher, P. S., Ervin, R. E., and Bogard, S. E.: An Experimental Design for Studying How Driver Characteristics Influence Headway Control. (1997)</i>
Eingesetzte Testmethode	Alltagsfahrten, Messfahrzeug
ACC-System	ACC ohne aktiven Bremseneingriff, max. Verzögerung: $-0,7\text{m/s}^2$
Zahl der Probanden (m/w)	42 Probanden (k.A./k.A.), Alterseinteilung in "Younger, Middle Aged und Older"
Dauer des Tests	2 Wochen je Proband, Alltagsnutzung

Studie	<i>Saad, F. &amp; Villame, T.: Assessing new driving support systems: contribution of an analysis of drivers' activity in real situations. (1996)</i>
Eingesetzte Testmethode	Realfahrten, Messfahrzeug
ACC-System	ACC kein aktiver Bremseneingriff
Zahl der Probanden (m/w)	9 Probanden (5/4), Durchschnittsalter 21 Jahre
Dauer des Tests	Trainingsdauer: 2 Stunden, Messfahrt ohne ACC: 1 Stunde, Messfahrt mit ACC 2 Stunden

Studie	<i>Ward, N. J., Humphreys M., Fairclough S.: A field study of behavioural adaptation with an autonomous intelligent cruise control system. (1996)</i>
Eingesetzte Testmethode	Realfahrten, Messfahrzeug
ACC-System	ACC kein aktiver Bremseneingriff
Zahl der Probanden (m/w)	15 Probanden (15/0), Altersverteilung: k.A.
Dauer des Tests	Trainingsdauer: 30 Minuten, Messfahrt mit und ohne ACC: 2,5 Stunden

Studie	<i>Nilsson, L.: Safety effects of Adaptive Cruise Controls in critical traffic situations. (1995)</i>
Eingesetzte Testmethode	Simulator moving-base
ACC-System	ACC, max. Verzögerung $-2$ bis $-3\text{m/s}^2$
Zahl der Probanden (m/w)	20 Probanden (10/10), Altersverteilung: 26-46 Jahre.
Dauer des Tests	Messfahrt 100km

# Abbildungsverzeichnis

Bild 2.1: Ebenen des menschlichen Handelns nach [Rasmussen 1983] und zugeordnete Bereiche der Fahrzeugführungsaufgabe nach [Donges 1992]

Bild 3.1: Übersicht der Versuchsstrecke

Bild 3.2: Schematische Sichtbereiche der Sensorik von ACC, LCA und LKA

Bild 3.3: Fahrzeugnutzung der Probanden auf der Autobahn

Bild 3.4: Ablauf der Probandenstudie

Bild 3.5: Ablauf des ACC-Trainings

Bild 3.6: Selbsteinschätzung des Fahrstils

Bild 3.7: Systemverständnis und kognitive Belastung

Bild 3.8: Häufigkeit und Zeitpunkt des Überholens

Bild 3.9: Bewertung von ACC-Grenzsituationen

Bild 3.10: Situation Rechtsüberholen

Bild 3.11: Prozess der automatisierten Datenauswertung

Bild 3.12: Veränderung der Durchschnittsgeschwindigkeit

Bild 3.13: Veränderung der Spurwechselanzahl

Bild 3.14: Definition der Ausscherzeitlücke

Bild 3.15: Veränderung des Ausscherabstandes

Bild 3.16: Veränderung der Ausscherdifferenzgeschwindigkeit

Bild 3.17: Definition der Wechseldauer

Bild 3.18: Veränderung der Wechseldauer

Bild 3.19: Definition der Fahrspurwahl

Bild 3.20: Veränderung in der Wahl der Fahrspur

Bild 3.21: Veränderung des Bremsverhaltens

Bild 3.22: Früher Spurwechsel

Bild 3.23: Navigationsspurwechsel

Bild 3.24: Einfädelhilfe Kooperationsspurwechsel

Bild 3.25: Annäherungsspurwechsel

Bild 3.26: Spurwechsel mit Folgephase

Bild 3.27: Spurwechsel mit Führungsfahrzeug

Bild 3.28: Unmotivierter Spurwechsel

Bild 3.29: Verteilung der Spurwechselklassen

Bild 4.1: Öffnungswinkel des ACC-Sensors

- Bild 4.2: Struktur der Spurwechselunterstützungsfunktion
- Bild 4.3: Relevante umgebende Fahrzeuge
- Bild 4.4: Zielobjektauswahl für Fahrzeuge auf der Zielspur
- Bild 4.5: Zielobjektauswahl für Fahrzeuge hinten
- Bild 4.6: Zielkonflikt letzter Spurwechsel vor der Abfahrt
- Bild 4.7: Verkehrssituation Spurwechselmotivation durch Vorderfahrzeug
- Bild 4.8: Prüfung der Geschwindigkeitsverhältnisse
- Bild 4.9: Kennlinie der Wunschgeschwindigkeit
- Bild 4.10: Differenzgeschwindigkeit zu festen Zeiten vor Spurwechselbeginn
- Bild 4.11: Differenzgeschwindigkeit zu Spurwechselbeginn
- Bild 4.12: Kennlinien der Differenzgeschwindigkeit mit Beschleunigungseinfluss
- Bild 4.13: Ableitung der Zeitlücke ( $dT_n$ ) (Dynamikgrenze)
- Bild 4.14: Kennlinien der Eintauchstärke
- Bild 4.15: Annäherungskritikalitätsmaß während des Spurwechsels
- Bild 4.16: Verkehrsszene Einfädelhilfe
- Bild 4.17: Abstand zum Einfädelfahrzeug bei Spurwechselbeginn
- Bild 4.18: Differenzgeschwindigkeit zum Einfädelfahrzeug bei Spurwechselbeginn
- Bild 4.19: Autobahnauffahrt nach StVO
- Bild 4.20: Querschleunigung während des Spurwechsels
- Bild 4.21: Querschleunigung relativ zum Maximum
- Bild 4.22: Abhängigkeit der Querschleunigung von der Fahrgeschwindigkeit
- Bild 4.23: Abhängigkeit der Querschleunigung von der Verkehrssituation
- Bild 4.24: Kurvenschar aller Spurwechseltrajektorien
- Bild 4.25: Mittlere Spurwechseltrajektorie aus den Messdaten und gewählte mathematische Beschreibungsfunktion
- Bild 4.26: Verkehrsszenario Reaktionszeitberechnung
- Bild 4.27: Diskretisierung der Spurwechseltrajektorie
- Bild 4.28: Verteilung der TTC zum Vorderfahrzeug
- Bild 4.29: Abhängigkeit der TTC zum Vorderfahrzeug von der Relativgeschwindigkeit
- Bild 4.30: Verteilung der TTC zum Vorderfahrzeug auf der Zielspur
- Bild 4.31: Verteilung der TTC zum Hinterfahrzeug
- Bild 4.32: Verteilung der  $T_n$  zum Vorderfahrzeug
- Bild 4.33: Korrelation der  $T_n$  mit der Relativgeschwindigkeit
- Bild 4.34: Verteilung der  $T_n$  zum Vorderfahrzeug auf der Zielspur

- Bild 4.35: Verteilung der  $T_n$  zum Hinterfahrzeug
- Bild 4.36: Korrelation von TTC und  $T_n$  zum Vorderfahrzeug
- Bild 4.37: Blinkerbenutzung beim Spurwechsel
- Bild 4.38: Querabweichung beim Spurwechsel
- Bild 4.39: Mittelwert der Quergeschwindigkeit während des Spurwechsels
- Bild 4.40: Quergeschwindigkeit im Verlauf des Spurwechsels
- Bild 4.41: Definition der Distance to Line Crossing
- Bild 4.42: Mittelwert der Time to Line Crossing
- Bild 4.43: TLC im Verlauf des Spurwechsels
- Bild 4.44: Mittelwert des kurvenbereinigten Lenkradwinkels
- Bild 4.45: Kurvenbereinigter Lenkradwinkel im Verlauf des Spurwechsels
- Bild 4.46: Einlenkbeginn beim Spurwechsel
- Bild 4.47: Lenkradwinkel relativ zum Maximum
- Bild 4.48: Lenkradwinkel abhängig von der Fahrgeschwindigkeit
- Bild 4.49: Prozess des Bypassings
- Bild 5.1: ACC/SWU- Reaktion und kognitive Belastung
- Bild 5.2: Überholzeitpunkt und Überholhäufigkeit
- Bild 5.3: Bewertung der Situationen erschwertes Überholen und Naheinscherer
- Bild 5.4: Bewertung der Situation falsche Spurwechselunterstützung
- Bild 5.5: Veränderung der Durchschnittsgeschwindigkeit
- Bild 5.6: Veränderung der Spurwechselanzahl
- Bild 5.7: Veränderung des Ausscherabstands
- Bild 5.8: Veränderung der Ausschergeschwindigkeit
- Bild 5.9: Veränderung der Wechseldauer
- Bild 5.10: Veränderung der Fahrspurwahl
- Bild 5.11: Veränderung des Bremsverhaltens
- Bild 5.12: Spurwechselklassen mit und ohne ACC/SWU
- Bild 6.1: Vergleich der Spurwahl 2005 und 2006
- Bild 6.2: Vergleich der Spurwechselverteilung 2005 und 2006
- Bild 6.3: Vergleich der Nutzertransparenz
- Bild 6.4: Vergleich des Übertretens per Gaspedal
- Bild 6.5: Vergleich des Abschaltverhaltens beim Abfahren
- Bild 6.6: Vergleich des Verhaltens beim Übertreten per Gaspedal 2005 und 2006
- Bild 6.7: Vergleich der Ausscherzeitlücke 2005 und 2006

- Bild 6.8: Vergleich der Ausscherdifferenzgeschwindigkeit 2005 und 2006
- Bild 6.9: Vergleich der Spurwechselklassen 2005 und 2006
- Bild 7.1: Anwendung der Fuzzy-Logik für die Spurwechselunterstützung
- Bild 7.2: Parametrierung des Motivators Wunschgeschwindigkeit
- Bild 7.3: Sonderfall der Wunschgeschwindigkeit
- Bild 7.4: Parametrierung des Motivators Differenzgeschwindigkeit
- Bild 7.5: Parametrierung der relativen Längsbeschleunigung
- Bild 7.6: Parametrierung des Motivators Eintauchstärke
- Bild 7.7: Parametrierung der Quergeschwindigkeit
- Bild 7.8: Parametrierung der Time-to-Line-Crossing
- Bild 7.9: Parametrierung des kurvenbereinigten Lenkradwinkels
- Bild 8.1: Scharfe und unscharfe Mengen
- Bild 8.2: Zugehörigkeitsfunktion in der Fuzzy-Logik
- Bild 8.3: Beispiel einer Fuzzifizierung
- Bild 8.4: Vergleich von Mamdani und Larsen Implikation
- Bild 8.5: Berechnung des Flächenschwerpunkts

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Clusteranalyse zur Fahrstileinteilung .....	38
Tabelle 3.2: Einteilung in Spurwechselklassen .....	50
Tabelle 4.1: Gründe für einen Spurwechsel nach Fastenmeier .....	60
Tabelle 4.2: Ergebnisübersicht zur Kritikalitätsbewertung (TTC und Tn) .....	94
Tabelle 5.1: Charakteristik der Probanden 2006 .....	109
Tabelle 5.2: Gemeinsame Zuordnung des Fahrstils für 2006 und 2005 .....	111
Tabelle 5.3: Nutzung von ACC bzw. ACC/SWU .....	116
Tabelle 6.1: Verteilung der Spurwechselarten .....	127
Tabelle 6.2: Leistungsbewertung der Spurwechselbeginn-Erkennung .....	136
Tabelle 7.1: Fuzzy-Logik Regelbasis für die Spurwechselformulation .....	144
Tabelle 7.2: Fuzzy-Logik Regelbasis für die Spurwechselbeginn-Erkennung .....	146
Tabelle 7.3: Reduzierte Regelbasis für die Spurwechselbeginn-Erkennung .....	147
Tabelle 7.4: Spurwechselbeginn-Erkennung numerische Umsetzung und Fuzzy-Logik im Vergleich .....	148
Tabelle 7.5: Leistungsanalyse der Spurwechselunterstützung numerische Umsetzung und Fuzzy-Logik .....	149
Tabelle 8.1: Verknüpfungsarten .....	155
Tabelle 8.2: Eigenschaften der T-Norm bzw. S-Norm .....	157
Tabelle 8.3: Weitere Operatoren der Fuzzy-Logik .....	157
Tabelle 8.4: Methoden der Implikation in der Fuzzy-Logik .....	159

---

# Literaturverzeichnis

- [ADAC 2007] STENGL, A.: *Blinkmuffel gefährden sich und andere Verkehrsteilnehmer*. Studie des ADAC, 2007.
- [Adelt et al. 1999] ADELDT, P.J., GRIMMER, W., STEPHAN, E.R.: *Autofahrertypen auf Deutschlands Straßen. Sicher Direct Studie 97'*. Verlag für neue Wissenschaften GmbH, Bremerhaven, 1999.
- [Ahmed 1999] AHMED, K.: *Modeling Drivers' Acceleration and Lane Changing Behavior*. Massachusetts Institute of Technology, Februar 1999.
- [AIDE] AIDE, *Abschlussbericht des AIDE Projekts INFORMATION SOCIETY TECHNOLOGIES (IST) PROGRAMME, IST-1-507674-IP*, September 2004.
- [AKTIV] AKTIV (Adaptive und Kooperative Technologien für den Intelligenten Verkehr). Online im Internet, <http://www.aktiv-online.org>. Forschungsinitiative deutscher Unternehmen und des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, Stand 24.8.2007.
- [Apel 1998] APEL, A.: *Modellierung des Fahrverhaltens bei Längs- und Querführung von PKW*. Dissertation TU Braunschweig, Verlag Papierflieger Claustal-Zellerfeld, 1998.
- [ASN] AVIATION SAFETY NETWORK (ASN): Online im Internet: <http://aviation-safety.net/statistics/period/sats.php?cat=A1>, Stand 24.10.2007.
- [Backhaus 2006] BACKHAUS, K.: *Multivariate Analysemethoden*. (11. überarb. Aufl.), Berlin Springer, 2006.
- [Bainbridge 1983] BAINBRIDGE, L.: *Ironies of Automation*. Automatica, Vol. 19. No 6. pp. 775-779, Pergamon Press, 1983.
- [Baum et al. 1996] BAUM, D., HAMANN, C. D., SCHUBERT E.: *High Performance ACC System based on Sensor Fusion with Distance Sensor, Image Processing Unit and Navigation System*. AVEC 96 International Symposium on Advanced Vehicle Control at the Aachen University of Technology, Juni 1996.
- [Bertram et al. 1994] BERTRAM, TH, SVARICEK, F., BINDEL, TH., BÖHM, R. KIENDL, H. PFEIFFER, B., WEBER, M.: *Fuzzy Control. Zusammenstellung und Beschreibung wichtiger Begriffe*. Aus der Arbeit der GMA, Automatisierungstechnik 42, 1994.
- [Biral et al. 2005] BIRAL, F., DA LIO, M., BERTOLAZZI, E.: *Combining safety margins and user preferences into a driving criterion for optimal control-based computation of reference maneuvers for an ADAS of the next generation*. Proceedings Intelligent Vehicles Symposium, IEEE, 2005.
- [Bishop 2005] BISHOP, R.: *Intelligent Vehicle Technology and Trends*. Artech House, Norwood, 2005.
- [Bjokrlly et al. 2003] BJOKRLY, C.A., JENNSEN, G.D., MOEN, T., VAA, T.: *Adaptive Cruise Control (ACC) and Driver Performance: Effects on Objective and Subjective Measures*. Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Transport Systems, Madrid, Spain, November 2003.

- 
- [Bock 2005] BOCK, TH.: *Simulations- und Testumgebung für Fahrerassistenzsysteme*. Technischer Bericht, Erprobung und Simulation in der Fahrzeugentwicklung – Mess- und Versuchstechnik, VDI Berichte 1900, 2005.
- [Bonny et al. 2001] BONNAY, F., LERMARCHAND, C., ZALILA, Z., COFFIN, F.: *Evaluation of a Fuzzy-System-based Automotive Copilot Dedicated to Lateral Guidance*. IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference, Joint 9th Volume 2, 2001.
- [Börcsök 2000] BÖRCÖK, J.: *Fuzzy Control – Theorie und Industrieinsatz*. Verlag Technik, Berlin, 2000.
- [Bortz 2005] BORTZ, J.: *Statistik für Sozialwissenschaftler, 6. Auflage*. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2005.
- [Bosch 2002] ROBERT BOSCH GmbH: *Adaptive Fahrgeschwindigkeitsregelung ACC*. Gelbe Reihe – Technische Unterrichtung Stuttgart, 2002.
- [Bote 1993] BOTE, H.-H.: *Fuzzy-Logic – Einführung in Theorie und Anwendungen*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1993.
- [Brandstätter et al. 2004] BRANDSTÄTTER, M., PRESTL, W., BAUER, G.: *Functional Optimization of Adaptive Cruise Control Using Navigation Data*. Intelligent Vehicle Initiative (IVI) SAE International, März 2004.
- [Brannolte 1980] BRANNOLTE, U.: *Verkehrsablauf an Steigungsstrecken von Richtungsfahrbahnen*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, (318), 1980.
- [Breuer & Christen 2002] BREUER, K. & CHRISTEN, F.: *Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen unter Verwendung von SIL- und HIL-Techniken im Verkehrsflusssimulationsprogramm PELOPS*. Verlag 11. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2002, Aachen, 2002.
- [Bruder & Abendroth 2007] BRUDER, R. & ABENDROTH, B.: *Zum Nutzen von Fahrversuchen für die Gestaltung*. Darmstädter Kolloquium Mensch und Fahrzeug, 2007.
- [BStmI] BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM DES INNEREN: Online im Internet: <http://www.stmi.bayern.de/sicherheit/verkehrssicherheit/unfallstatistik>, Stand 24.10.2007.
- [Bubb 1977] BUBB, H.: *Analyse der Geschwindigkeitswahrnehmung im Kraftfahrzeug*. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, 31(2) pp.103-111, 1977.
- [Bubb 2002] BUBB, H.: *Umsetzung psychologischer Forschungsergebnisse in die ergonomische Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen*. Zeitschrift für Verkehrssicherheit 48 pp.8-15, 2002.
- [Buld & Krüger 2002] BULD, S. & KRÜGER, H.P.: *Wirkungen von Assistenz und Automation auf Fahrerzustand und Fahrsicherheit*. Projektbericht Emphasis, 2002.
- [Burg & Rau 1981] BURG, H. & RAU, H.: *Handbuch der Verkehrsunfall-Rekonstruktion*. Verlag INFORMATION Ambs GmbH, 1981.
- [Canale & Malan 2002] CANALE, M. & MALAN, S.: *Tuning of stop and go driving control strategies using driver behaviour analysis*. IV'2002, IEEE Intelligent Vehicle Symposium, Versailles, France, 2002.
- [Card et al. 1983] CARD, S.K., MORAN, T.P., NEWELL, A.: *The Psychology of Human-Computer-Interaction*. Lawrence Erlbaum Associates, Inc., 1983.
-

- [Dagli & Reichardt 2002] DAGLI, I. & REICHARDT, D.: *Motivation-Based Approach To Behavior Prediction*. IEEE Intelligent Vehicle Symposium, 2002.
- [Daimler 2004] DAIMLER CHRYSLER: *Mehr sehen – besser, die Vision Unfallfreies Fahren. Rechnergestützte Situationsanalyse*. Hightech Report 1/2004 pp.28-31, 2004.
- [de Vlieger et al. 2000] VLIENER DE I., KEUKELEERE DE D., KRETSCHMAR J. G.: *Environmental effects of driving behaviour and congestion related to passenger cars*. Atmospheric Environment 34 pp.4649-4655, 2000.
- [Deml et al. 2006] DEML, B., BLASCHKE, CH., FÄRBER, B.: *Prädiktion des Fahrstils zur adaptiven Auslegung von Assistenzsystemen*. Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt, 48. Fachausschusstagung für Anthropotechnik: Cognitive Systems Engineering in der Fahrzeug- und Prozessführung, Karlsruhe, 2006.
- [Deml et al. 2007] DEML, B., FREYER, J., FÄRBER, B.: *Ein Beitrag zur Prädiktion des Fahrstils*. VDI Kongress, Fahrer im 21. Jahrhundert Braunschweig 14 -15. November, 2007.
- [Didier & Landau 2005] DIDIER, M. & LANDAU, K.: *Komfortbeurteilungen von ACC (Adaptive Cruise Control) Systemen mit Hilfe des Bremsverhaltens*. Hrsg. GdA Personalmanagement und Arbeitsgestaltung, GdA Press, Dortmund, 2005.
- [Donges 1992] DONGES, E.: *Das Prinzip der Vorhersehbarkeit als Auslegungskonzept für Maßnahmen zur aktiven Sicherheit im Straßenverkehrssystem*. Das Mensch Maschine System im Verkehr, VDI Gesellschaft Fahrzeugtechnik, 1.Fachtagung, Berlin, 1992.
- [Dragutinovic et al. 2005] DRAGUTINOVIC, N., BROOKHUIS, K.A., HAGENZIEKER, M.; MARCHAU, V.: *Behavioural effects of Advanced Cruise Control Use – a meta-analytic approach*. EJTIR, 5, no. 4, pp. 267-280, 2005.
- [Dspace 2006] DSPACE GLOSSAR:  
[http://www.dspace.com/ww/de/pub/home/products/systems/functp/bypass/glossar\\_bypassing.cfm](http://www.dspace.com/ww/de/pub/home/products/systems/functp/bypass/glossar_bypassing.cfm), Link aus dem Internet, Stand 24.8.2007
- [Ebersbach 2005] EBERSBACH, D.: *Entwurfstechnische Grundlagen für ein Fahrerassistenzsystem zur Unterstützung des Fahrers bei der Wahl seiner Geschwindigkeit*. Dissertation Fakultät Verkehrswissenschaften der Technischen Universität Dresden, 2005.
- [Ehmanns 2002] EHMANN, D.: *Modellierung des taktischen Fahrerhaltens bei Spurwechsellvorgängen*. Institut für Kraftfahrzeugwesen RWTH Aachen, November 2002.
- [EU01] EUROPÄISCHE KOMMISSION: *Die europäische Verkehrspolitik bis 2010: Weichenstellungen für die Zukunft*. Weissbuch, Amt für amtliche Veröffentlichungen der Europäischen Gemeinschaften, L-2985 Luxembourg, 2001.
- [EU03] ARBEITSDOKUMENT DER KOMMISSION: *Ausführliche Folgenabschätzung bezüglich Informations- und Kommunikationstechnologien für sichere und intelligente Fahrzeuge*. (KOM(2003) 542 endgültig) Brüssel, 2003.
- [EU03-1] EUROPÄISCHE KOMMISSION: *Europäisches Aktionsprogramm für die Straßenverkehrssicherheit: Halbierung der Zahl der Unfallopfer im Straßenverkehr in der Europäischen Union bis 2010: Eine gemeinsame Aufgabe*. KOM(2003), Juni 2003.
- [Fancher et al. 1998] FANCHER, P., ERVIN, R., SAYER, J., HAGAN, M., BOGARD, S., BAREKET, Z., MEFFORD, M., HAUGEN, J.: *Intelligent cruise control field operation test. Final Report*. NHTSA Report No. DOT HS808 849, 1998.

- 
- [Färber & Färber 2003] FÄRBER B. & FÄRBER B.: *Auswirkungen neuer Informationstechnologien auf das Fahrverhalten*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Mensch und Sicherheit, Heft M 149, Wirtschaftsverlag, Bremerhafen, 2003.
- [Färber & Färber 2004] FÄRBER B. & FÄRBER B.: *Mehr Verkehrssicherheit durch intelligente Steuerung von Telematik-Systemen*. Verkehrspsychologie, Mobilität - Sicherheit - Fahrerassistenz, (Hrs. B. Schlag), Pabst Science Publishers, Lengerich, 2004.
- [Färber 1986] FÄRBER, B.: *Abstandswahrnehmung und Bremsverhalten von Kraftfahrern im fließenden Verkehr*. Zeitschrift für Verkehrssicherheit (32) pp. 9-13, 1986.
- [Färber 1987] FÄRBER, B.: *Geteilte Aufmerksamkeit*. Verlag TÜV Rheinland Köln, 1987.
- [Fastenmeier 1995] FASTENMEIER, W.: *Autofahrer und Verkehrssituation – neue Wege zur Bewertung von Sicherheit und Zuverlässigkeit moderner Straßenverkehrssysteme*. Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1995.
- [Fastenmeier et al. 2001] FASTENMEIER, W., HINDERER, J., LEHNING, U., GSTALTER, H.: *Analyse von Spurwechselvorgängen im Verkehr*. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, 55(1), pp.15 – 23, 2001.
- [Fechner 1860] FECHNER, G. TH.: *Elemente der Psychophysik*. Leipzig erschienen in 2 Bänden, 1860.
- [Freyer & Maurer 2006] FREYER J. & MAURER, M.: *Analyse des Fahrverhaltens unter dem Einfluss von Fahrerassistenzsystemen in Realfahrten*. 4. Workshop Fahrerassistenzsysteme, Löwenstein, 2006.
- [Freyer et al. 2007] FREYER, J., DEML, B., MAURER, M., FÄRBER, B.: *ACC with enhanced situation awareness to reduce behavior adaptations in lane change situations*. IEEE Intelligent Vehicle Istanbul, 2007.
- [Freyer et al. 2006] FREYER, J., SIEDERSBERGER, K.H., HELD, R.: *Verfahren zum Betrieb eines Längsführungssystems in einem Kraftfahrzeug (DE 10 2006 001 710 A1 2007.08.16)*, Bundesrepublik Deutschland Deutsches Patent- und Markenamt, Anmeldetag: 13.01.2006.
- [Freyer et al. 2007] FREYER, J., SIEDERSBERGER, K.H., HELD, R.: *Verfahren zum Betrieb eines Längsführungssystems in einem Kraftfahrzeug (EP 1 808 350 A1)*, Europäisches Patentamt, Anmeldetag: 10.01.2007.
- [Fuller 1984] FULLER, R.: *A conceptualisation of driving behaviour as threat avoidance*. Ergonomics, 27, pp.1139-1155, 1984.
- [Gipps 1986] GIPPS, G. P.: *A model for the structure of lane-changing decision*. Transportation Research B, Vol. 20B No. 5, pp.403-414, 1986.
- [Godthelp et al. 1984] GODTHELP, H., MILGRAM, P., BLAAUW, G.J.: *The development of a time-related measure to describe driving strategy*. Human Factors 26 (3) pp.257-268, 1984.
- [GRAND CHALLENGE] DARPA GRAND CHALLENGE: Online im Internet, [www.darpa.mil/grandchallenge05](http://www.darpa.mil/grandchallenge05), Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA), Stand 24.8.2007.
- [Grashey 1999] GRASHEY, ST.: *Ein Klassifikationsansatz zur fertigkeitbasierten Verhaltensmodellierung beim Autofahren*. Dissertation an der Universität der Bundeswehr München, 1999.
-

- 
- [Grayson 1996] GRAYSON, G.B.: *Behavioural adaption: a review of the literature*. TRL Report 254, 1996.
- [Hamberger 1999] HAMBERGER, W.: *Verfahren zur Ermittlung und Anwendung von prädiktiven Streckendaten für Assistenzsysteme in der Fahrzeugführung*. Fortschrittsberichte VDI Reihe 12 Verkehrssicherheit / Fahrzeugtechnik, 1999.
- [Harms & Tönross 2004] HARMS, L. & TÖNROSS, J.: *Brake Activity of Drivers and of an Automated Brake System in Simulated Critical and Non-Critical Driving Szenarios*. Traffic & Transport Psychology. Theory and Application pp.317-323. Elsevier, 2004.
- [Hashimoto et al. 2000] HASHIMOTO, M., SUETOMI, T., OKUNO, A., UEMURA, H.: *A Study on driver model for lane change judgement*. Society of Automotive Engineers of Japan Elsevier Science, Dezember 2000.
- [Heinsohn et al. 1999] HEINSOHN, J. & SOCHER-AMBROSIUS, R.: *Wissensverarbeitung– Eine Einführung*. Spektrum Akademischer Verlag GmbH, Heidelberg Berlin, 1999.
- [Hoedemaker & Brookhuis 1998] HOEDEMAEKER, M. & K. BROOKHUIS, K.: *Behavioural adaptation to driving with an adaptive cruise control (ACC)*. Transportation Research, Part F, 1, pp.95-106, 1998.
- [Hoedemaker & Kopf 2001] HOEDEMAEKER, M. & KOPF, M.: *Visual sampling behaviour when driving with adaptive cruise control*. Proceedings of the 9th International Conference on Vision in Vehicles, Australia, August 2001.
- [Hoedemaker 2000] HOEDEMAEKER, M.: *Driving with intelligent vehicles. Driving behaviour with ACC and the acceptance by individual drivers*. IEEE Intelligent Transportation Systems, 2000.
- [Hoedemaker et al. 1998] HOEDEMAEKER, M., ANDRIESEN, J., WIETHOF, M., BROOKHUIS, K.A.: *Effects of Driving Style on Headway Preference and Acceptance of an Adaptive Cruise Control (ACC)*. IATSS Research 22 (2) pp.29-36, 1998.
- [Homann 2005] HOMANN, K.: *Wirtschaft und gesellschaftliche Akzeptanz: Fahrerassistenzsysteme auf dem Prüfstand*. Workshop Fahrerassistenzsysteme im Kfz Walting, in Maurer/Stiller Springer Verlag, 2005.
- [INVENT] INVENT (Intelligenter Verkehr und Nutzergerechte Technik). Online im Internet, <http://www.invent-online.de>, Forschungsinitiative deutscher Unternehmen und des Bundesministeriums für Bildung und Forschung, Stand 24.8.2007.
- [Ioannou & Stefanovic 2005] IOANNOU, P. & STEFANOVIC, M.: *Evaluation of ACC Vehicles in Mixed Traffic: Lane Change Effects and Sensitivity Analysis*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems Vol. 6, 2005.
- [Irmscher 2001] IRMSCHER, M.: *Modellierung und Simulation von Motivationseinflüssen auf das Fahrerverhalten*. Fortschritt- Berichte Reihe 22 Nr.6 VDI, 2001.
- [ISO 15622: 2002] INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDIZATION (ISO): *Transport information and control systems - Adaptive Cruise Control Systems - Performance requirements and test procedures*. ISO 15622, 2002.
- [ISO 17361: 2007] INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDIZATION (ISO): *Intelligent transport systems - Lane departure warning systems - Performance requirements and test procedures*. ISO 17361, 2007.
-

- 
- [ISO 17387: 2006] INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDIZATION (ISO): *Intelligent Transportation Systems - Lane Change Decision Aid Systems - Performance requirements and test procedures*. ISO 17387, 2006.
- [Juergensohn 1997] JÜRGENSOHN, TH.: *Hybride Fahrermodelle*. ZMMS Spektrum Band 4, Pro Universitate Verlag, 1997.
- [KBA] KRAFTFAHRT-BUNDESAMT (KBA): (<http://www.kba.de>, Stand: 05/2007).
- [Kita 1993] KITA, H.: *Effect of Merging Lane Length on the Merging Behavior at Expressway On-ramps*. Proceedings of the 12th International Symposium on the Theory of Traffic Flow and Transportation, pp. 37-51, 1993.
- [Kopf & Nirschl 1997] KOPF, M. & NIRSCHL, G.: *Driver-vehicle interactions while driving with ACC in borderline situations*. Intelligent Transport Systems and services IST, 1997.
- [Kopf & Simon 2001] KOPF, M. & SIMON, J.: *A Concept for a Learn-Adaptive Advanced Driver Assistance System*. Proceedings of the Conference on Cognitive Science Approaches 2001, Neubiberg, September 2001.
- [Kopf 1993] KOPF, M.: *Ein Beitrag zur modellbasierten, adaptiven Fahrerunterstützung für das Fahren auf deutschen Autobahnen*. Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik UniBW München, Juni 1993.
- [Kovordanyi 2005] KOVORDANYI, R.: *When will Advanced Driver Support Systems be User-Adaptive? The Case of Adaptive Cruise Control*. AAAI Spring Symposium, 2005.
- [Kraiss 1985] KRAISS, K.F.: *Fahrzeug und Prozessführung*. Springer Verlag Berlin, 1985.
- [Kretschmer et al. 2006] KRETSCHMER, M., KÖNIG, L., NEUBECK J., WIEDEMANN, J.: *Erkennung und Prädiktion des Fahrerverhaltens während eines Überholvorgangs*. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenzsysteme, FTM TU München, 2006.
- [Lee 1976] LEE, D.N.: *A theory of visual control braking based on information about time to collision*. Perception, 5, pp.437–459, 1976.
- [Leutzenbach & Willmann 1975] LEUTZENBACH, W. & WILLMANN, G.: *Zustandsformel des Verkehrsablaufs: Übergang vom freien zum teilgebundenen Verkehr auf zweispurigen Richtungsfahrbahnen*. Forschungsauftrag des BM für Verkehr, Institut für Verkehrswesen Uni Karlsruhe, 1975.
- [Leutzenbach 1966] LEUTZENBACH, W.: *Probleme der Kolonnenfahrt*. BmV Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, (Band 44), 1966.
- [Maurer & Stiller 2005] MAURER, M. & STILLER, CH.: *Fahrer-Assistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*. Springer Verlag Berlin, 2005.
- [Maurer 2000] MAURER, M.: *Flexible Automatisierung von Straßenfahrzeugen mit Rechnersehen*. Dissertation Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Fortschrittsberichte VDI, Reihe 12 Nr.443, Neubiberg, 2000.
- [McDonald et al. 1997] MCDONALD, M., WU, J., BRACKSTONE, M.: *Development of a Fuzzy Logic Based Microscopic Motorway Simulation Model*. Intelligent Transportation System, 1997. ITSC 97. IEEE Conference on Volume, Issue, pp. 82 - 87, 1997.

- [Meyer-Tuve & Heissing 2007] MEYER-TUVE, H. & HEISSING, B.: *Ermittlung quantifizierbarer Bewertungen zur Fahrdynamik über einen modellbasierten Ansatz*. 3. Kolloquium Mensch und Fahrzeug, Darmstadt, 2007.
- [Michels et al. 2002] MICHELS, K., KLAWONN, F., KRUSE, R., NÜRNBERGER, A.: *Fuzzy-Regelung – Grundlagen, Entwurf, Analyse*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2002.
- [Mikut et al. 1999] MIKUT, R., BÖHLMANN, S., CUNO, B., JÄKEL, J., KROLL, A., RAUSCHENBACH, T., PFEIFFER B.-M., SLAWINSKI, T.: *Fuzzy-Logik und Fuzzy Control – Begriffe und Definitionen*. Kiendl, H.; Knicker, R. (Hrsg.): Berichtband 9. GMA-Workshop Fuzzy Control, Forschungsbericht 0499 der Fakultät für Elektrotechnik Universität Dortmund, 1999.
- [Montes et al. 2007] MONTES, N., MORA, M., TORNERO, J.: *Trajectory Generation based on Rational Bezier Curves as Clothoids*. Proceedings of the 2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Istanbul, pp.505-510, Juni 2007.
- [Näätänen & Summala 1974] NÄÄTÄNEN, R., & SUMMALA, H.: *A model for the role of motivational factors in driver's decision-making*. Accident Analysis and Prevention, 6, pp.243-261, 1974.
- [Nelson 1989] NELSON, W.: *Continuous-Curvature Path for Autonomous Vehicles*. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1260-4, 1989.
- [Neumerkel et al. 2002] NEUMERKEL, D., RAMMELT, P., REICHARDT, D., STOLZMANN, W., VOGLER, A.: *Fahrermodelle - Ein Schlüssel für unfallfreies Fahren*. Künstliche Intelligenz Heft 3/02, arentap Verlag, Bremen, 2002.
- [Neunzig & Benmimoun 2002] NEUNZIG, D. & BENMIMOUN, A.: *Potentiale der vorausschauenden Fahrerassistenz zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs*. 11. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentchnik, Aachen, 2002.
- [Niehoff 2005] NIEHOFF, H.: *Fahrdynamische Komfortgrenzen eines Normalfahrers in Längs- und Querrichtung*. Institut für Verkehrsführung und Fahrzeugführung, Braunschweig, 2005.
- [Nilson 1995] NILSSON, L.: *Safety effects of Adaptive Cruise Controls in critical traffic situations*. VERTIS (Ed.) Proceedings of the, Second World Congress on Intelligent Transport Systems - Steps forward, Yokohama, Japan, November 1995.
- [Nilson et al. 2002] NILSON, L., HARMS, L., PETERS, B.: *The effect of road transport telematics*. In P. Barjonnet (Ed) Traffic Psychology today, Kluwer Academic Publishers, Boston-Dordrecht-London, pp.265-285, 2002.
- [Obojski et al. 2000] OBOJSKI, M.A., ROCH, H., VIVO, G., CITELLI, S.: *Research Activities on Lateral Control Support: the European Project LACOS*, ATA, Vol.53, 2000.
- [Olsen et al. 2002] OLSEN, E., LEE, S., WIERWILLE, W.: *Analysis of Distribution, Frequency, and Duration of Naturalistic Lane Changes*. Proceedings of the HUMAN FACTORS AND ERGONOMICS SOCIETY 46th ANNUAL MEETING, 2002.
- [Opwis 1992] OPWIS, K.: *Kognitive Modellierung*. Hans Huber Verlag Bern, 1992.
- [Pfeiffer et al. 2002] PFEIFFER, B.M., JÄKEL, J., KROLL, A., KUHN, Ch., KUNTZE, H.B., LEHMANN, U., SLAWINSKI, T., TEWS, V.: *Erfolgreiche Anwendungen von Fuzzy Logik und Fuzzy Control (Teil 1+2)*. Automatisierungstechnik 11, Oldenburg Verlag, 2002.

- 
- [Popken 2006] POPKEN, M.: *Q7-Audi Side Assist*. Automotive, Carl Hanser Verlag München 2006.
- [Raffael et al. 2006] RAFFAEL, M., SANCHEZ, M., MUCINO, V., CERVANTES, J.: *Impact of driving styles on exhaust emissions and fuel economy from a heavy-duty truck: laboratory tests*. Int. J. Heavy Vehicle Systems, Vol.13 Nos. 1/2, 2006.
- [Rasmussen 1983] RASMUSSEN, J.: *Skills Rules and Knowledge*. IEEE Transactions, SMC-13(3), pp.257-266 1983.
- [Regan 1986] REGAN, D., KAUFMANN, L., Lincoln J.: *Motion in Depth and Visual Acceleration*. Handbook of Perception and Human Performance, Wiley and Sons New York, 1986.
- [Rekersbrink 1994] REKERSBRINK, A.: *Verkehrsflußsimulation mit Hilfe der Fuzzy-Logic und einem Konzept potentieller Kollisionszeiten*. Dissertation Universität Karlsruhe, 1994.
- [Rohmert 1987] ROHMERT, W.: *Laborstudien versus Feldstudien. Die Bedeutung von Feldstudien für die Arbeitsphysiologie*. Festkolloquium aus Anlass des 75. Geburtstags von Herbert Scholz, Dortmund, 1987, Dokumentation Arbeitswissenschaft, Bd. 17, Köln Dr. Otto Schmidt Verlag, 1987.
- [Runkel 1969] RUNKEL, M.: *Die Bedeutung der Sichtbehinderung durch Lastkraftwagen für Überholvorgänge auf zweispurigen Landstraßen*. Dissertation, TH-Stuttgart, 1969.
- [Saad & Villame 1996] SAAD, F. & VILLAME, TH.: *Assessing new driving support systems: contribution of an analysis of drivers' activity in real situation*. Proceedings 3rd Annual World Congress Intelligent Transport Systems, 1996.
- [Saad 1996] SAAD, F.: *Driver Strategies in Car Following Situations*. GAI VD Vision in Vehicles pp.61-71 North Holland, 1996.
- [Saad 2004] SAAD, F.: *Behavioural adaptations to new driver support systems. Some critical issues*. IEEE Conference on systems, Man and Cybernetics, 2004.
- [Salvucci 2005] SALVUCCI, D. D.: *Integrated Models of Driver Behavior*, Integrated Models of Cognitive Systems (Hrsg. W. D. Gray) Oxford University Press, New York, 2005.
- [Sayer et al. 1998] SAYER, J. R., MEFFORD, M. L., FANCHER, P. S., ERVIN, R. E., BOGARD, S. E.: *An Experimental Design for Studying How Driver Characteristics Influence Headway Control*. Intelligent Transportation System, 1997. ITSC 97. IEEE Conference, pp.870 – 875, 1997.
- [Schimmelpfennig & Nackenhorst 1985] SCHIMMELPFENNIG K.H. & NACKENHORST, U.: *Bedeutung der Querbeschleunigung in der Verkehrsunfallrekonstruktion - Sicherheitsgrenze des Normalfahrers*. Der Verkehrsunfall: Heft 4, April 1985.
- [Schindler 2007] SCHINDLER, V.: *Fahrerassistenzsysteme der Zukunft*. 6. Internationale VDI Tagung Fahrzeugsicherheit 2007, Innovativer Insassen und Partnerschutz, Berlin, 2007.
- [Schlag & Richter 2000] SCHLAG, B. & RICHTER, S.: *Wahrnehmungs- und Sozialpsychologische Hintergründe von Nebelunfällen*. Zeitschrift für Verkehrssicherheit 46, 3, pp.114-120, 2000.
- [Schmitt & Färber 2005] SCHMITT, J. & FÄRBER, B.: *Verbesserung von FAS durch Fahrerabsichtserkennung mit Fuzzy Logic*. Fahrer im 21. Jahrhundert, VDI Bericht 1919 Düsseldorf, VDI Verlag, 2005.
-

- 
- [Schmitt et al. 2006] SCHMITT, J., FÄRBER, B., MAURER, M., BREU, A.: *Menschliches und technisches Verhalten an den Systemgrenzen eines FAS*. Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenz, 22. Internationale VDI Gemeinschaftstagung Wolfsburg, 2006.
- [Schnittger 1991] SCHNITTGER, S.: *Einfluss von Sicherheitsanforderungen auf die Leistungsfähigkeit von Schnellstraßen*. Dissertation Universität Karlsruhe, 1991.
- [Schreiner 1999] SCHREINER, F.: *Automatische Führung des Kraftfahrzeugs mit fahreradaptiven Eigenschaften*. Fortschrittsberichte VDI Reihe 12 Nr. 404 VDI Verlag Düsseldorf, 1999.
- [Siedersberger 2003] SIEDERSBERGER, KARL-HEINZ: *Komponenten zur automatischen Fahrzeugführung in sehenden (sem-i) autonomen Fahrzeugen*. Dissertation Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Neubiberg, 2003.
- [Siedersberger 2004] SIEDERSBERGER, K.H.: *Trends bei Fahrerassistenzsystemen*. Fahrerassistenzsysteme: Licht, Sicht und Sicherheit, Dezember 2004.
- [Simon 2005] SIMON, J.: *Learning to drive with Advanced Driver Assistance Systems. Empirical studies of an online tutor and a personalised warning display on the effects of learnability and the acquisition of skill*. Dissertation Philosophische Fakultät der TU Chemnitz, 2005
- [Sousa et al. 1997] SOUSA, J.M., BABUSKA, R., VERBRUGGEN H.B.: *Fuzzy predictive control applied to an air conditioning system*. Control Engineering Practice 5, 10, pp. 1395–1406, 1997.
- [Sparmann 1978] SPARMANN, U.: *Spurwechselforgänge auf zweispurigen BAB-Richtungsfahrbahnen*. Bundesministerium für Verkehr (263), 1978.
- [Spindler 1962] SPINDLER, W.: *Querbesehleunigungen und die Wahl der Überholwege bei der Kurvenfahrt von Kraftfahrzeugen*. Dissertation, TU-München, 1962.
- [Sporrer et al. 1998] SPORRER, A., PRELL, G., BUCK, J, SCHALBLE, ST. : *Realsimulation von Spurwechselforgängen im Straßenverkehr*. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 36, 1998.
- [Stanton & Young 1997] STANTON, N.A., YOUNG, M.: *Drive by Wire: the case of driver workload and reclaiming control with adaptive cruise control*. Safety Science 27 2/3 pp.149-159, 1997.
- [Sträter 2001] STRÄTER O.: *Modellierung und Bewertung kognitiver Aspekte der Aufgaben eines Fahrers*. Der Fahrer im 21. Jahrhundert VDI Berichte Nr.1613, 2001.
- [Stüker 2003] STÜKER, D.: *Heterogene Sensordatenfusion zur robusten Objektverfolgung im Automobilen Straßenverkehr*. Dissertation Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, 2003.
- [StVO] STRAßENVERKEHRSORDNUNG, ([http://www.bmvbs.de/Anlage/original\\_966396 / Straßenverkehrs -Ordnung.pdf](http://www.bmvbs.de/Anlage/original_966396/Straßenverkehrs-Ordnung.pdf)), Stand: 24.08.2007
- [Suttorp 2002] SUTTORP, T.: *Prädiktion von Fahrspurwechseln*. Ruhr-Universität Bochum, Institut für Neuroinformatik unveröffentlicht, 2002.
- [Tilli 1992] TILLI, TH.: *Mustererkennung mit Fuzzy-Logik*. Franzis-Verlag GmbH, München, 1992.
- [Toenros et al. 2002] TOENROS, J., NILSSON, L., OESTLUND, J., KIRCHER, A.: *Effects of ACC on driver behaviour, workload and acceptance in relation to minimum time headway*.
-

- Proceedings of the 9th world congress on intelligent transport systems, Chicago, Illinois, USA, 2002.
- [Toledo et al. 2003] TOLEDO, T., KOUTSOPOULOS H. N., BEN-AKIVA M. E.: *Modeling Integrated Lane-changing Behavior*. Transportation Research Record No. 1857, Transportation Network Modeling, 2003.
- [Tresilian 1991] TRESILIAN, J.R.: *Empirical and theoretical issues in the perception of time to contact*. Journal of experimental psychology: Human perception and performance 17 pp.865-876, 1991.
- [Tricot 2004 et al.] TRICOT, N., RAJAONAH, B. PACAUX ,M.P., POPIEUL J: *Driver's behavior and Human-Machine interactions characterization for the design of an Advanced Driver Assistance System*. IEEE Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2004.
- [Tricot et al. 2002] TRICOT N., SONNERAT D., POPIEUL J. C.: *Driving Styles and Traffic Density Diagnosis in Simulated driving Conditions*. IEEE Intelligent Vehicle Symposium, Versailles, France, June 18-20, Vol. 1, pp. 298-303, 2002.
- [URBAN CHALLENGE] DARPA URBAN CHALLENGE. Online im Internet, [www.darpa.mil/grandchallenge](http://www.darpa.mil/grandchallenge), Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA), Stand 24.8.2007.
- [van der Horst 1990] VAN DER HORST, A. R. A.: *A timebased analysis of road user behaviour in normal and critical encounters*. PhD thesis, Institute for Perception TNO, 1990.
- [van Winsum & Heino 1996] VAN WINSUM, W. & HEINO, A.: *Choice of timeheadway in carfollowing and the role of timetocollision information in braking*. Ergonomics, No 4, pp. 579-592, 1996.
- [Vollrath et al. 2005] VOLLRATH,M., KNAKE-LANGHORST, S., NEUNZIG, D., BENMIMOUN, A., TOTZKE, I., BULD, S.: *Adaptivität von Fahrerassistenz an den Verkehrszustand – ein Baustein für humane Automation im Verkehr*. VDI Berichte Nr.1919 Fahrer im 21. Jahrhundert, 2005.
- [von Garrel 2003] VON GARREL, U.: *Adaptive Modellierung des fertigkeitbasierten Fahrerhaltens durch konstruktives und evaluierendes Lernen*. Shaker Verlag Fahrzeugtechnik, Aachen, 2003.
- [Ward et al. 1996] WARD, N. J., HUMPHREYS, M., FAIRCLOUGH S.: *A field study of behavioural adaptation with an autonomous intelligent cruise control system*. Handbook of the International Conference on Traffic and Transport Psychology, Valencia, Spain, 1996.
- [Weinberger 2001] WEINBERGER M.: *Der Einfluss von Adaptive Cruise Control auf das Fahrerverhalten*. Shaker Verlag Aachen, 2001.
- [Weiss & Kirchner 2004] WEISS, K. & KIRCHNER, A.: *Sensordatenfusion und Fahrsceneninterpretation für Fahrerassistenzsysteme*. 5. Symposium Automatisierungs- und Assistenzsysteme für Transportmittel, Braunschweig, 2004.
- [Weiss 1988] WEISS, E.: *Untersuchung und Rekonstruktion von Ausweich- und Fahrspurwechsellvorgängen*. Forschungsberichte VDI, 1988.
- [Wiedemann 1974] WIEDEMANN, R.: *Simulation des Straßenverkehrsflusses*. Institut für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe (8), 1974.

- [Wilde 1994] WILDE, G.J.S.: *Risk Homeostasis Theory And Its Promise For Improved Safety*. In: R. Trimpop & G. J. S. Wilde (Eds.), *Challenges To Accident Prevention: The issue of risk compensation behaviour*. Groningen: STYX-Publications, 1994.
- [Willner & Meurle 2005] WILLNER, R.-G. & MEURLE, J.: *Situative Assistenz 2015*. VDI Berichte Nr.1919 Fahrer im 21 JHT, 2005.
- [Wilmann 1978] WILMANN, G.: *Zustandsformen des Verkehrsablaufs auf Autobahnen*. Institut für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, (19), 1978.
- [Winner & Luh 2007] WINNER, H. & LUH, ST.: *Fahrversuche zur Funktionsbewertung von ACC – Eine Zwischenbilanz*. Darmstädter Kolloquium Mensch und Fahrzeug, 2007.



