

Audi Dissertationsreihe



Benutzerorientierte Entwicklung und fahrergerechte Auslegung eines Querführungsassistenten

Mathias Mann



Benutzerorientierte Entwicklung und fahrerergerechte Auslegung eines Querführungsassistenten

Dipl.-Ing. (univ.) Mathias Mann

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Willibald A. Günthner

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Heißing
2. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Heiner Bubb

Die Dissertation wurde am 05.07.2007 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 21.11.2007 angenommen.

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.: (TU) München, Univ., Diss., 2007

ISBN 978-3-86727-547-7

Audi Dissertationsreihe, Band 2

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2008

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

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

ISSN 1865-9268

ISBN 978-3-86727-547-7

Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, die vorliegende Dissertation mit dem Titel „Benutzerorientierte Entwicklung und fahrergerechte Auslegung eines Querführungsassistenten“ selbstständig und ausschließlich mit den angegebenen Hilfsmitteln verfasst zu haben. Des Weiteren habe ich bis heute an keiner Universität einen Promotionsversuch unternommen.

Mathias Mann

München, 15. Dezember 2007

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand in den Jahren 2002 bis 2005 im Zuge meiner Tätigkeit als Doktorand bei der AUDI AG im Bereich der Vorentwicklung Elektrik/Elektronik. Einen besonderen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit leistete hier Herr Dipl.-Inform. Markus Popken. Zudem danke ich meinem Betreuer Herrn Dipl.-Ing. Alejandro Vukotich für seine Unterstützung.

Während meiner Doktorandentätigkeit betreute ich den Beitrag der AUDI AG im Teilprojekt „Vorausschauende Aktive Sicherheit (VAS)“ am Forschungsprojekt „INVENT (Intelligenter Verkehr und nutzergerechte Technik)“. Mein herzlicher Dank gilt aus diesem Kreis vor allem Herrn Dipl.-Ing. Walter Schwertberger von der MAN Nutzfahrzeuge AG und Herrn Dr.-Ing. Dirk Ehmanns von der BMW Group Forschung und Technik für die ausgesprochen angenehme Zusammenarbeit. Zudem danke ich Herrn Dr. Frank Schierge und seinen Kollegen von der TÜV Kraftfahrt GmbH für die gemeinsame Arbeit bei wichtigen Untersuchungen zum Querführungsassistenten.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing Bernd Heißing vom Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik in München danke ich für die wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit und die Übernahme des Hauptreferates. Für die Übernahme des Koreferates bedanke ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Heiner Bubb.

Meiner Familie und besonders meiner Schwester Frau Regierungsrätin Andrea Mann danke ich für die ununterbrochene Unterstützung in diesen Jahren. Meiner Freundin Frau Dipl.-Math. Maria Meiler gilt mein persönlichster Dank.

Mathias Mann

München, Dezember 2007

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung	2
1.3 Aufbau	4
2 Hintergrund	6
2.1 Straßenverkehrssicherheit	6
2.1.1 Aktueller Stand	6
2.1.2 Effekt passiver Sicherheit	11
2.1.3 Möglichkeiten aktiver Sicherheit	14
2.2 Definition des relevanten Begriffsumfeldes	16
2.2.1 Längsführung	16
2.2.2 Querführung	16
2.2.3 Fahrzeugführung	16
2.2.4 Spurhalten	17
2.2.5 Spurwechsel	17
2.2.6 Spurverlassenswarner	18
2.2.7 Spurhalteunterstützung	18
2.2.8 Spurwechselassistent	18
2.2.9 Spurwechselunterstützung	19
2.2.10 Querführungsassistent	19
2.3 Mensch als Fahrzeugführer	19
2.3.1 Einflussfaktoren	20
2.3.2 Aufgaben	23
2.3.3 Informationsverarbeitung	25
2.3.4 Fehler und Absicht	28
2.3.5 Querführungsverhalten	30
2.3.6 Unterstützungsmöglichkeiten	40
2.4 Fahrerassistenzsysteme	41
2.4.1 Kategorisierung	41
2.4.2 Architektur	44
2.4.3 Funktionalitäten	44
2.4.4 Aktuelle Systemlösungen	47
2.4.5 Roadmap	50
2.4.6 Mensch-Maschine-Schnittstelle	51
2.5 Ableitung der Aufgabenstellung	56
2.5.1 Situationsanalyse	57
2.5.2 Zieldefinition	58
2.5.3 Systemspezifikation	59
2.5.4 Bewertung	61

3 Querführungsassistent	62
3.1 Unfalldatenanalyse	62
3.1.1 Unfalldatenerhebung	62
3.1.2 Untersuchungsziel	64
3.1.3 Untersuchungsmethodik	65
3.1.4 Untersuchungsergebnisse	67
3.1.5 Sicherheitspotentialabschätzung	73
3.1.6 Diskussion	76
3.2 Multimediale Kundenbefragung	78
3.2.1 Befragungsziel	78
3.2.2 Befragungsmethodik	79
3.2.3 Befragungsstichprobe	80
3.2.4 Befragungsergebnisse	81
3.2.5 Diskussion	86
3.3 Expertenbefragung zur Sensorarchitektur	87
3.3.1 Begriffsbestimmung	88
3.3.2 Bewertungskriterien	88
3.3.3 Befragungsziel	91
3.3.4 Expertenpool	91
3.3.5 Befragungsmethode	91
3.3.6 Sensorbewertung	92
3.3.7 Sensordatenfusion	100
3.3.8 Sensortopologie für einen Querführungsassistenten	101
3.3.9 Diskussion	104
3.4 Zusammenfassung	104
4 Auslegung der Mensch-Maschine-Schnittstelle	106
4.1 Menschliche Informationskanäle	106
4.1.1 Überblick	106
4.1.2 Charakteristik	108
4.2 Simulatorversuch zu Informationskanälen	109
4.2.1 Versuchsziel	110
4.2.2 Versuchsmethode	110
4.2.3 Versuchspersonen	111
4.2.4 Versuchsdurchführung	111
4.2.5 Versuchsauswertung	112
4.2.6 Versuchsergebnisse	112
4.3 Diskussion	115

5 Versuchsfahrzeug	116
5.1 Systemaufbau	117
5.2 Sensorarchitektur	117
5.3 Softwareentwicklung	120
5.4 Mensch-Maschine-Schnittstelle	120
5.5 Bedienschnittstelle	123
5.6 Netzwerk	123
5.7 Zusammenfassung	124
6 Entwurf einer fahrgerechten Warnstrategie	126
6.1 Gestaltungsprinzipien	126
6.2 Rechtzeitigkeit und Rechtmäßigkeit	129
6.2.1 Der absichtliche Spurwechsel	131
6.2.2 Das unbeabsichtigte Spurverlassen	139
6.3 Fahrversuch zur Schnittstellenmodalität	141
6.3.1 Versuchsziel	142
6.3.2 Hypothesenbildung	143
6.3.3 Methodik	144
6.3.4 Versuchspersonen	144
6.3.5 Versuchsaufbau	145
6.3.6 Versuchsdurchführung	146
6.3.7 Versuchsergebnisse zum subjektiven Systemeindruck	146
6.3.8 Auswertung der Fahrleistungsparameter	151
6.3.9 Diskussion	155
6.4 Fahrversuch zum Unterstützungsgrad	156
6.4.1 Modellierung der Spurhalte- und Spurwechselunterstützung	156
6.4.2 Versuchsziel	158
6.4.3 Hypothesenbildung	160
6.4.4 Versuchsmethodik	161
6.4.5 Versuchspersonen	161
6.4.6 Versuchsaufbau	162
6.4.7 Versuchsdurchführung	162
6.4.8 Versuchsergebnisse	162
6.4.9 Diskussion	167

6.5 Fahrversuch zur Spurwechseleerkennung	168
6.5.1 Vorhersage des Querführungsverhaltens	169
6.5.2 Versuchsziel	172
6.5.3 Hypothesenbildung	174
6.5.4 Versuchsmethodik	174
6.5.5 Versuchspersonen	174
6.5.6 Versuchdurchführung	175
6.5.7 Versuchsergebnisse	175
6.5.8 Diskussion	176
6.6 Zusammenfassung	177
7 Bewertung des Gesamtsystems	178
7.1 Versuchsziel	180
7.2 Methodik	181
7.3 Versuchspersonen	182
7.4 Versuchsaufbau	183
7.5 Versuchsdurchführung	184
7.6 Versuchsergebnisse	184
7.6.1 Beschreibung und Einstellung des Probandenpools	184
7.6.2 Wahrnehmbarkeit und Signalgestaltung	186
7.6.3 Bewertung der Mensch-Maschine-Schnittstellen	187
7.6.4 Auswahl der Systemfunktionalität	189
7.6.5 Rechtzeitigkeit und Rechtmäßigkeit	191
7.6.6 Gebrauchssicherheit	192
7.6.7 Bewertung des Gesamtsystems	196
7.7 Diskussion	198
8 Zusammenfassung und Ausblick	201
A Fragebogen Bewertung des Gesamtsystems	204
Literatur	211

1 Einleitung

1.1 Motivation

Sicherheitsbetonte Anschauungen, abnehmende Risikobereitschaft und eine verstärkte Individualisierung entwickeln sich nach einer Studie des Bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie zu einigen dominanten Verhaltensmustern der künftigen Gesellschaft [6]. Diese so genannten „Megatrends“ werden sich in den Entwicklungen und Aktivitäten der Automobilindustrie spiegeln müssen. Um ihre Produkte weltweit wettbewerbsfähig zu machen, haben die Fahrzeughersteller die Wünsche der Kunden nach steigendem Komfort und Leistungsansprüchen gepaart mit dem Wunsch nach stärkerer Individualität, nachhaltiger Mobilität und Umweltverträglichkeit zu erfüllen. Damit geht direkt ein gesteigertes Bedürfnis nach Schutz und Sicherheit im Allgemeinen und Verkehrssicherheit im Besonderen einher. Diese Anforderungen bilden ein Spannungsfeld zwischen Wohlstand, Verkehr und Umwelt, welches nach neuartigen Systemlösungen verlangt, die das Autofahren noch umweltverträglicher, angenehmer und vor allem sicherer machen.

Der Mensch gilt nach wie vor als Hauptursache von Unfällen im Straßenverkehr. Um die Unfallfolgen zu mindern, wurden in den vergangenen Jahrzehnten auf dem Gebiet der passiven Fahrzeugsicherheit große technische Fortschritte erzielt, die in den amtlichen Unfallstatistiken deutlich zu Tage treten. Alle bisher im Fahrzeug verfügbaren Sicherheitssysteme sehen jedoch die Fahrzeuggrenzen als Systemgrenzen an. Durch Fahrerassistenzsysteme, die die bisherigen Systemgrenzen erweitern und Informationen über das, das eigene Fahrzeug umgebende, Umfeld mit einbeziehen, können passive Maßnahmen um aktive Sicherheitsansätze ergänzt und Unfälle entweder ganz vermieden oder zumindest deren Unfallschwere reduziert werden. Die aktiven Sicherheitssysteme im Automobil werden zukünftig einen enormen wirtschaftlichen Faktor darstellen. Nach einer Studie von Mercer Management Consulting wird der Gesamtmarkt für Fahrzeugsicherheit von 48 Mrd. Euro im Jahr 2003 auf 62 Mrd. Euro im Jahr 2010 wachsen [87]. Diese Studie prognostiziert bei der Betrachtung der Marktentwicklung verschiedener Fahrzeugkomponenten den Fahrerassistenzsystemen den zweitgrößten Wachstumsmarkt nach der Fahrzeugkommunikation. Das angenommene durchschnittliche jährliche Wachstum bei Fahrerassistenzsystemen von 14% bedeutet für 2010 nahezu eine Verdreifachung des Marktvolumens auf 2,5 Mrd. Euro.

Fahrerassistenzsysteme sollen den Fahrer in der unfallfreien Erfüllung seiner Fahraufgaben unterstützen. Sie interagieren sehr stark mit dem Fahrer, der Teil der Regelschleife bleiben sollte. Dieser Sachverhalt stellt ganz neue Herausforderungen an die Produktentwicklung, da Fahrerassistenzsysteme in gleichem Maße aufgaben- wie benutzerorientierte Funktionalitäten in hoher Qualität aufweisen müssen. Die Schnittstelle des Systems zum Benutzer gewinnt an Wichtigkeit, da aus Kundensicht die Mensch-Maschine-

Schnittstelle (MMS)¹ stellvertretend für das jeweilige System steht. Sie beeinflusst die Erlebbarkeit, aber auch das Verständnis und die Erlernbarkeit des Gesamtsystems. Die Akzeptanz der Benutzer und damit auch der Produkterfolg und die Verkaufschancen sind direkt von der Qualität der Schnittstelle zwischen Fahrer und Fahrerassistenzsystem abhängig. Eine sinnvolle Funktionalität des Systems kann bei einer Darbietung über eine suboptimale Mensch-Maschine-Schnittstelle vor den Kunden versagen. Aber auch eine qualitativ hochwertige Auslegung derselben kann eine schlechte Funktionalität nicht verschleiern. Der konsequent fahrergerichten Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle kommt dabei eine essentielle Bedeutung zu. Sie ist in höchstem Maße verkaufsentscheidend, nicht nur für das einzelne System, sondern durch die zunehmend stärker werdende Bedeutung aktiver Sicherheitstechnologien am Markt möglicherweise verkaufsentscheidend für das jeweilige Fahrzeug. Neben Kundenzufriedenheit und Wettbewerb sorgen aber auch Aspekte der Produkthaftung dafür, dass die Hersteller auf eine sichere Gestaltung der Systeme und der Mensch-Maschine-Schnittstelle im Speziellen achten. Die Automobilhersteller haben somit ein Eigeninteresse daran, Fahrerassistenzsysteme qualitativ hochwertig und ergonomisch sinnvoll zu gestalten. Diese Herausforderung kann nur durch ein konsequentes Zusammenspiel von Technik, Design und Ergonomie bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen erfolgreich bestanden werden.

Fehler bei der Spurhaltung und beim Spurwechsel führen besonders auf Autobahnen und Landstraßen zu einer Vielzahl von schweren Unfällen. Systeme, die den Fahrer einerseits am ungewollten Verlassen der Fahrspur hindern oder ihn andererseits beim gewollt initiierten Spurwechsel vor möglichen Kollisionspartnern warnen, durchlaufen gerade die Serienentwicklung oder werden den Kunden bereits vereinzelt angeboten. Eine Sammlung von Einzelsystemen kann aber dazu führen, dass der Fahrer aufgrund der nicht abgestimmten Warn- und Informationsstrategie bzw. mehrerer um seine Aufmerksamkeit konkurrierender Systemausgaben eher verwirrt als unterstützt wird. Daraus erhebt sich der Wunsch nach einem integrierten Assistenzsystem [60]. Diesem Anliegen kommt der Querschnittsassistent (QFA) nach. Als Integration mehrerer Teilsysteme kann er den Fahrer beim Spurhalten und beim Spurwechsel gleichermaßen kooperativ unterstützen. Die Präsentation der Systemaktionen muss über eine konsistente und transparente Mensch-Maschine-Schnittstelle erfolgen.

1.2 Zielsetzung

Bei heutigen Fahrzeugen ist ein Trend zur Integration von vielen Funktionen in zentrale Systeme mit gemeinsamer Mensch-Maschine-Schnittstelle festzustellen. Mit der Verwendung einer zentralen Bedieneinheit beispielsweise kann trotz zahlreicher Funktionen eine übersichtliche Bedienoberfläche geschaffen werden. In Zukunft werden Fahrerassistenzsysteme Fragen zur Auslegung der Mensch-Maschine-Schnittstelle aufwerfen, die mit den

¹ auch **M**ensch-**M**aschine-**I**nterface (MMI) oder **H**uman **M**achine **I**nterface (HMI)

etablierten Mitteln nicht mehr beantwortet werden können. Anders als in der klassischen Fahrzeug-Ergonomie, die zum Ziel hat, beispielsweise Bedienelemente optimal zu gestalten und zu platzieren, müssen bei einem Fahrerassistenzsystem die gesamten Wechselwirkungen zwischen Fahrer, Fahrzeug und Verkehrssituation berücksichtigt werden. Fahrer und Assistenzsystem kooperieren, um gemeinsam die Aufgaben der Fahrzeugführung sicher, komfortabel und effizient zu bewältigen. Ziel ist es, die Kommunikation und Interaktion zwischen Fahrer und System intuitiv zu gestalten. Neben der Berücksichtigung inter- und intraindividuelle Unterschiede muss dies auch in der Vielzahl verschiedener Fahr- und Verkehrssituationen und der ihnen eigenen Dynamik sichergestellt sein. Trotz der damit zwangsläufig steigenden technischen Komplexität der Systeme muss gewährleistet sein, dass die sichtbare und erlebbare Systemkomplexität in einem für den Bediener durchschaubaren und handhabbaren Rahmen bleibt und in Zukunft nicht parallel zur technischen Systemkomplexität stetig zunimmt.

Die bisherige Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen geht oftmals nur vom technisch Machbaren aus. Aus dem Stand der Technik und den am Markt verfügbaren Technologien werden Systeme abgeleitet, die erst in einem zweiten Schritt mit der eigentlichen Situation bzw. Motivation verglichen und nachträglich anhand der realen Gegebenheiten bewertet werden. Diesem konventionellen Ansatz wird in dieser Arbeit ein problemorientierter Ansatz gegenüber gestellt (siehe Bild 1).

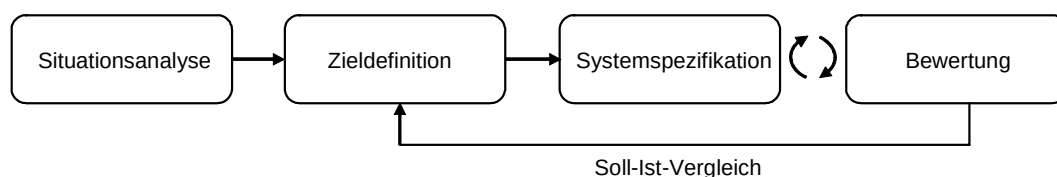


Bild 1: Problemorientierter Ansatz zur Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen

Der dem Problemlösungszyklus des *Systems Engineering*² nachempfundene Entwicklungspfad beginnt hierbei nicht mit der technikbasierten Lösungssynthese, sondern leitet aus der Situationsanalyse die notwendigen Rückschlüsse ab, aus der dann nach der Definition des Zielkataloges das eigentliche technische System erwächst. Ausgangspunkt sind in diesem Fall Erkenntnisse aus der eingehenden Situationsbetrachtung, wie sie im Fall der Fahrerassistenzsysteme beispielsweise aus der Auswertung von Unfalldaten oder der frühzeitigen Befragung und Einbindung potentieller Nutzer gewonnen werden können. Eine genaue Analyse der Situation und die Definition der relevanten Ziele zeigen Ansätze auf, die in der konkretisierten Spezifikation eines „idealen“ Assistenzsystems münden.

² Auf Basis des Systemansatzes, der aus dem Bewusstsein um die Vielfalt und die Interpendenzen der Einflussgrößen entstand, entwickelte sich als Leitfaden zur problemgerechten und effizienten Abwicklung komplexer Vorhaben das **Systems Engineering** (SE). Mit seinen modular kombinierbaren Grundbausteinen lassen sich einerseits auch sehr komplexe Problemstellungen methodisch zweckmäßig bearbeiten, andererseits unterstützt es den Parallelismus von Arbeitsabläufen zur Beschleunigung des Entwicklungsprozesses („Simultaneous Engineering“).

Diese Spezifikation wird erst in einem folgenden Schritt zur Systementwicklung mit den technischen Randbedingungen in Beziehung gesetzt und ergibt ein Assistenzsystem, das dann den Weg der industriellen Serienentwicklung durchlaufen kann.

Diese Arbeit stellt Ansätze und Ergebnisse vor, wie die Entwicklung des Gesamtsystems und die fahrergerechte Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle unter der Prämisse eines problemorientierten Entwicklungspfades und dem Ansatz kooperativer Fahrerassistenz anhand des Systems Querführungsassistent vollzogen werden kann. Dieses System hat zum Ziel, den Fahrer in den Aufgaben ‚Spurwechsel‘ und ‚Spurhaltung‘ zu unterstützen, um das Unfallrisiko in diesen beiden querführenden Fahrmanövern deutlich zu reduzieren. Die Arbeit legt einen Fokus auf diejenigen Methoden, die realitätsnah zu Erkenntnissen beispielsweise bezüglich des Sicherheitsnutzens, zu Kundenwünschen und zur Systemakzeptanz führen können. Die nachfolgend geschilderten Ansätze werden dazu ihre Wirksamkeit im Realfahrzeug unter Beweis stellen.

1.3 Aufbau

Das Kapitel 2 geht zunächst auf die relevanten Grundlagen ein. Eine Betrachtung des aktuellen Standes der Fahrzeug- und Verkehrssicherheit dient dabei der Motivation, mit Ansätzen zur Unfallvermeidung an der stetigen Verbesserung der Fahrzeugsicherheit zu arbeiten. Der Mensch mit seinen Eigenschaften steht im Zentrum dieser Arbeit. Dieser Ansatz findet seine erste Entsprechung in der ausführlichen Beschreibung der Aufgaben, der Informationsaufnahme und der Fehler des menschlichen Fahrers bei der Fahrzeugführung. Das Kapitel runden Beschreibungen zum Stand der Technik, zur Kategorisierung und zu Entwicklungsmöglichkeiten von Fahrerassistenzsystemen ab.

Der Spezifikation des Querführungsassistenten widmet sich Kapitel 3. Die darin vorgestellten Methoden und Ergebnisse dienen im Kontext des in der Einleitung vorgestellten problemorientierten Ansatzes zur Situationsanalyse und Zielformulierung. Der Querführungsassistent soll den Fahrer bei Spurhaltung und Spurwechsel unterstützen. Im Rahmen einer Unfalldatenanalyse wird dazu herausgearbeitet, welche Situationen ein Querführungsassistent adressieren sollte, um einen optimalen Einfluss auf die Verbesserung der Verkehrssicherheit bewirken zu können. Eine multimediale Kundenbefragung dient dazu, bereits in frühen Phasen des Produktentstehungsprozesses die Ansprüche der Kunden zu erfassen und die Wünsche in die Spezifikation des Systems einfließen zu lassen. Eine Expertenbefragung soll abschließend dazu dienen, aus den bis dahin erarbeiteten Anforderungen an das System eine mögliche Sensorplattform für den Querführungsassistenten abzuleiten.

Es gibt zahlreiche Möglichkeiten der Interaktion zwischen Fahrer und System. Im Kapitel 4 wird anhand einer im Simulator durchgeführten Versuchsreihe für die Signale Lenkmoment, Lenkradvibration, Sitzvibration und einem Warnton der Zusammenhang zwischen

Reiz und Reaktion näher untersucht. Es soll gezeigt werden, dass in kritischen Situationen bestimmte Signale zu einer schnelleren und zudem richtigen Reaktion des Fahrers führen können. Nur so können die Aktionen des Systems den Fahrer in kritischen Situationen bei Spurhaltung und Spurwechsel auch rechtzeitig unterstützen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Versuchsfahrzeug aufgebaut, mit dem die verschiedenen Systemkomponenten und Funktionalitätsstände im realen Straßenverkehr untersucht werden konnten. In Kapitel 5 wird auf Sensoren, Verarbeitungseinheit, Mensch-Maschine-Schnittstelle und Signal- und Netzwerktopologie des Versuchsträgers eingegangen, mit jenen die in den nachfolgenden Kapiteln dargestellten Versuchsreihen durchgeführt wurden.

Kapitel 6 beschreibt Ansätze zur fahrergerechten Auslegung der Mensch-Maschine-Schnittstelle eines Querführungsassistenten. Eingangs werden Gestaltungsprinzipien erörtert, die es bei der Systemauslegung zu berücksichtigen gilt. Auch die zum Verstehen der folgenden Abschnitte notwendigen Systembeschreibungen und Warnstrategien werden thematisiert. Diese Ausführungen spezifizieren nach dem problemlösungsorientierten Entwicklungsansatz das System, müssen nun aber in einer Bewertungsphase mit den Forderungen und Wünschen potentieller Kunden abgeglichen werden. Deshalb schließen sich die Beschreibungen dreier, vom Autor durchgeführter Versuchsreihen an, in denen auf einen Vergleich zwischen unimodaler und multimodaler Systemauslegung, auf das akzeptierte Maß des Unterstützungs- bzw. Automatisierungsgrades und auf die Akzeptanz einer Spurwechselerkennung näher eingegangen wird. Die Ergebnisse dienen dazu, grundlegende Ansätze zur fahrergerechten Auslegung eines Querführungsassistenten zu formulieren.

Eine abschließende Bewertung der einzelnen Komponenten der Mensch-Maschine-Schnittstelle sowie des Gesamtsystems zur Unterstützung des Fahrers in querführenden Fahrmanövern wird in Kapitel 7 vorgenommen. Im Rahmen eines Fahrversuchs auf öffentlichen Straßen mit einer Versuchsgruppe, die als repräsentativ für Fahrer der Oberklasse bzw. der oberen Mittelklasse gelten kann, werden Wahrnehmbarkeit und Signalgestaltung, präferierte Mensch-Maschine-Schnittstelle, Rechtmäßigkeit und Rechtzeitigkeit der Systemaktionen, Gebrauchssicherheit, allgemeine Einstellung und Akzeptanz des Gesamtsystems untersucht.

Kapitel 8 rundet die vorliegende Arbeit ab, indem es die vorstehend erarbeiteten und diskutierten Ergebnisse zusammenfasst und den Blick für weitere Verbesserungs- und Entwicklungsmöglichkeiten öffnet. Die Arbeit liefert insgesamt einen Beitrag dazu, die benutzerorientierte Entwicklung und fahrergerechte Gestaltung eines Fahrerassistenzsystems zu strukturieren und zu realisieren, um den Leistungsumfang des Systems möglichst genau auf die Unterstützungssituationen und die Eigenschaften und Wünsche des menschlichen Bedieners abzustimmen.

2 Hintergrund

Die erfolgreiche Gestaltung eines Fahrerassistenzsystems ist davon abhängig, wie gut die verantwortlichen Entwickler es verstehen, die vielfältigen Anforderungen und zahlreichen Randbedingungen aus verschiedensten Themengebieten in einem möglichst optimalen Entwurf zu vereinen. Die Betrachtung der aktuellen Situation in der Fahrzeugsicherheit und die eingehende Analyse des menschlichen Verhaltens, besonders im Hinblick auf die Informationsverarbeitung und die Fehlerentstehung, legt neben der Berücksichtigung des aktuellen Stands der Technik bei Assistenzsystemen und deren Mensch-Maschine-Schnittstelle die Grundlage zum Verständnis dieser Arbeit. Aus diesem Grund soll auf den nachfolgenden Seiten auf die wichtigsten Sachverhalte aus den genannten Themengebieten eingegangen werden. Die Erklärungen und Beschreibungen in den anschließenden Kapiteln dieser Arbeit werden sich regelmäßig auf die Ausführungen dieses Kapitels beziehen.

2.1 Straßenverkehrssicherheit

Der Wunsch nach individueller Mobilität und der damit einhergehende Individualverkehr auf der einen sowie der stetig zunehmende Güter- und Warenverkehr, der ungebrochen stark über das Straßennetz abgewickelt wird, auf der anderen Seite, bleiben nicht ohne negative Folgen. Neben Auswirkungen beispielsweise auf die Umwelt kommen in Unfällen Menschen körperlich zu Schaden. Wie stark die Folgen für Leib und Leben der Verkehrsteilnehmer sind, lässt sich am anschaulichsten anhand der statistischen Betrachtung zur Entwicklung des motorisierten Verkehrs, der Unfallereignisse und der dabei verletzten und getöteten Personen aufzeigen. Die Ergebnisse tragen zur stetigen Motivation der Fahrzeughersteller bei, geeignete passive Schutzmaßnahmen weiterzuentwickeln und aktive Sicherheitssysteme, wie die in dieser Arbeit thematisierten Fahrerassistenzsysteme, schnellstmöglich auf dem Markt zu platzieren.

2.1.1 Aktueller Stand

Das Kraftfahrzeug hat größtenteils unseren Wunsch nach individueller Mobilität erfüllt, dient als konjunkturbestimmendes Wirtschaftsprodukt und hat damit zum Wachstum von Wohlstand und Freiheit des Einzelnen beigetragen [43]. Der Pkw ist dabei nach wie vor das beherrschende Verkehrsmittel im Individualverkehr. Nach einer Studie des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen werden zurzeit etwa 60% aller Wege mit dem Auto zurückgelegt [11]. Zudem stellt der Straßenverkehr die Infrastruktur bereit, um einen großen Teil des Güter- und Warenverkehrs zu bewältigen.

Bild 2, das aus Daten des Statistischen Bundesamtes erstellt wurde, zeigt, wie sich für Deutschland bezogen auf das Jahr 1970 Bestand, Gesamtfahrleistung und durchschnittli-

che Inländer-Fahrleistung³ von Pkw verändert haben [12]. Im Zeitraum von 1970 bis 1993 stieg die Zahl aller in Deutschland zugelassenen Kraftfahrzeuge um 250%, obwohl die Bevölkerung nur um 2,5% zunahm. Seit der Wiedervereinigung 1990 stieg in Deutschland der Pkw-Bestand bis 2004 um 8% auf fast 45 Mio. zugelassene Fahrzeuge. Heute besitzen vier von fünf Haushalten ein Auto, wobei sich eine Quote von 1,1 Fahrzeugen pro Haushalt bzw. 0,7 Fahrzeugen pro volljährigen Bundesbürger ergibt [11]. Die Gesamtfahrleistung von Personenwagen stieg zunächst kontinuierlich bis zum Jahr 1999, seit 2000 fällt sie und geht nach Ansicht des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung in den kommenden Jahren weiter zurück [21]. Der Grund dürfte in den zunehmenden Kosten liegen, die für Betrieb und Unterhalt der Fahrzeuge anfallen.

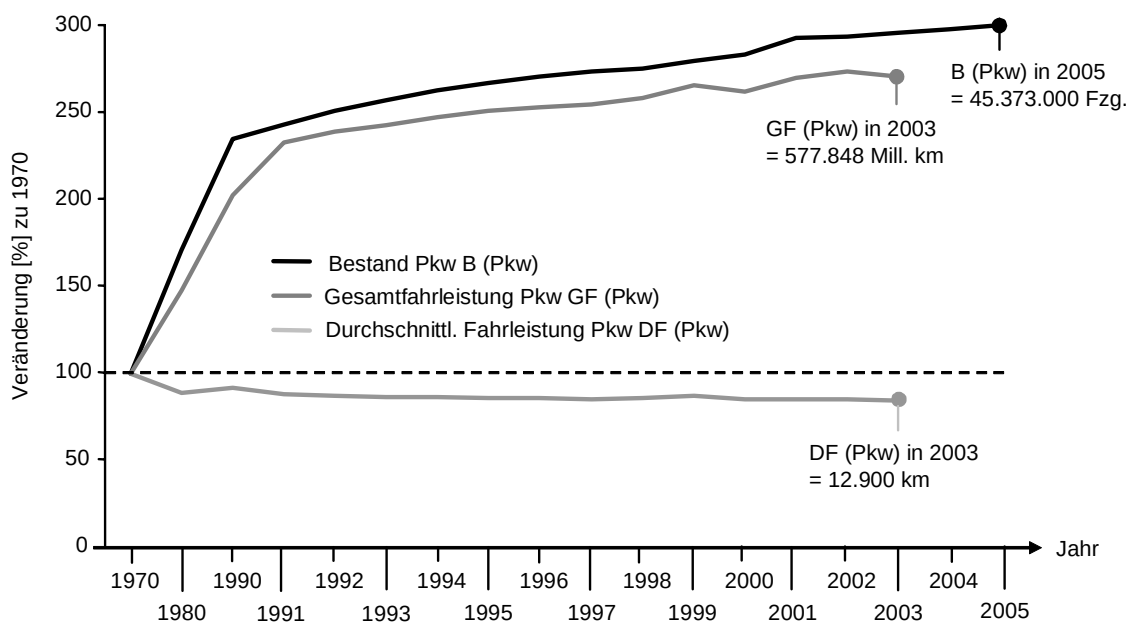


Bild 2: Relative Veränderung von Bestand, Gesamtfahrleistung und durchschnittlicher Inländer-Fahrleistung von Pkw für Deutschland bezogen auf 1970 nach Daten des Statistischen Bundesamtes

Im Vergleich zum privaten Verkehr nehmen, trotz forcierter Anstrengungen zur Umlenkung des gewerblichen Verkehrs weg vom Straßenverkehr hin zu alternativen Verkehrsmitteln, sowohl Bestand als auch Gesamtfahrleistung des Straßengüterverkehrs weiterhin in enormem Maße zu. Auch die Öffnung der Grenzen der Europäischen Union gen Osten in Länder mit ausgeprägtem fahrzeugbezogenem Warenverkehr wird diese Problematik aller Voraussicht nach nur noch weiter verschärfen. Bild 3 zeigt die entsprechenden Kennzahlen für Lastkraftwagen und Sattelzugmaschinen für die bundesdeutsche Situation.

³ Inländer-Fahrleistung ist die von Deutschen erbrachte Fahrleistung einschließlich Auslandsstrecken.

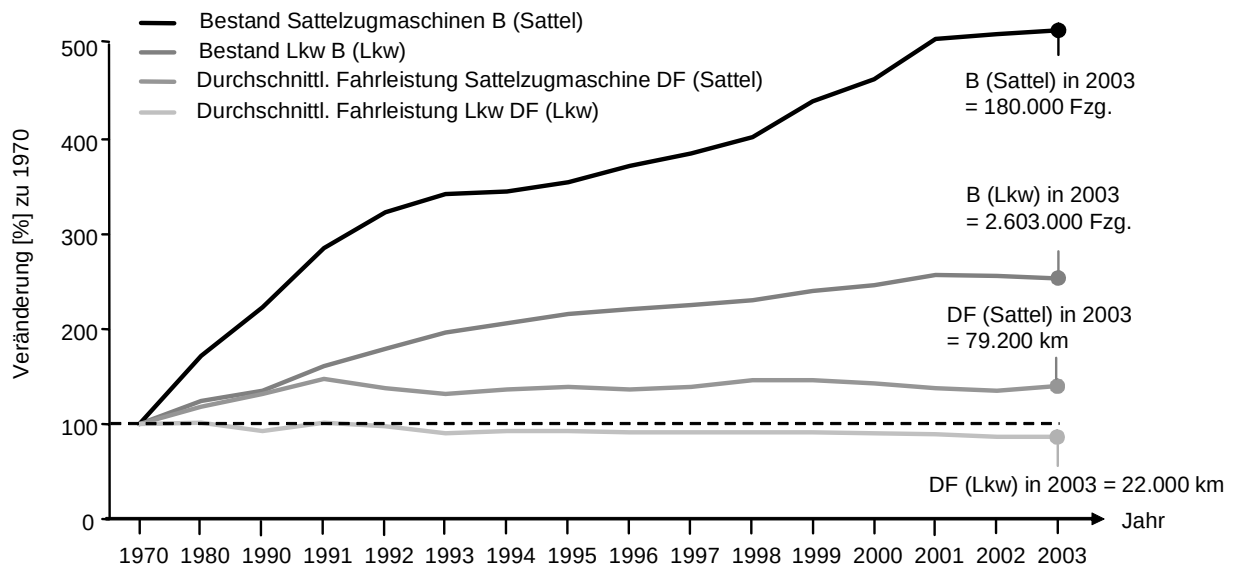


Bild 3: *Relative Veränderung von Bestand und durchschnittlicher Inländer-Fahrleistung von Lastkraftwagen und Sattelzugmaschinen für Deutschland bezogen auf 1970 nach Daten des Statistischen Bundesamtes*

Die negativen Folgen des motorisierten Verkehrs sind enorm. Nach Analysen des statistischen Bundesamtes starben bei Verkehrsunfällen in Deutschland seit 1953, dem Jahr in dem nach dem 2. Weltkrieg die Verkehrsunfallstatistik wieder aufgenommen wurde, insgesamt 692.000 Personen [89]. Das sind mehr Getötete als Frankfurt am Main heute Einwohner hat. Die meisten tödlich Verunglückten wurden nach polizeilichen Angaben für 1970 ermittelt. Seit diesem Jahr zeigt die Statistik verletzter und getöteter Verkehrsteilnehmer, abgesehen von einer heute überwundenen Trendumkehr in den Jahren kurz nach der Wiedervereinigung, eine stetige Verbesserung der Verkehrssicherheit für das Bundesgebiet. Zwar bleibt die Zahl der polizeilich erfassten Unfälle mit Personenschäden, wohl als Tribut an den steigenden Fahrzeugbestand bzw. die stetig zunehmende Gesamtfahrleistung von Pkw und Lkw, annähernd konstant, die Anzahl an getöteten Verkehrsteilnehmern aber sinkt kontinuierlich. Im Jahr 2003 wurden im Straßenverkehr aber immer noch 462.615 Personen verletzt und 6.606 Personen getötet (siehe Bild 4).

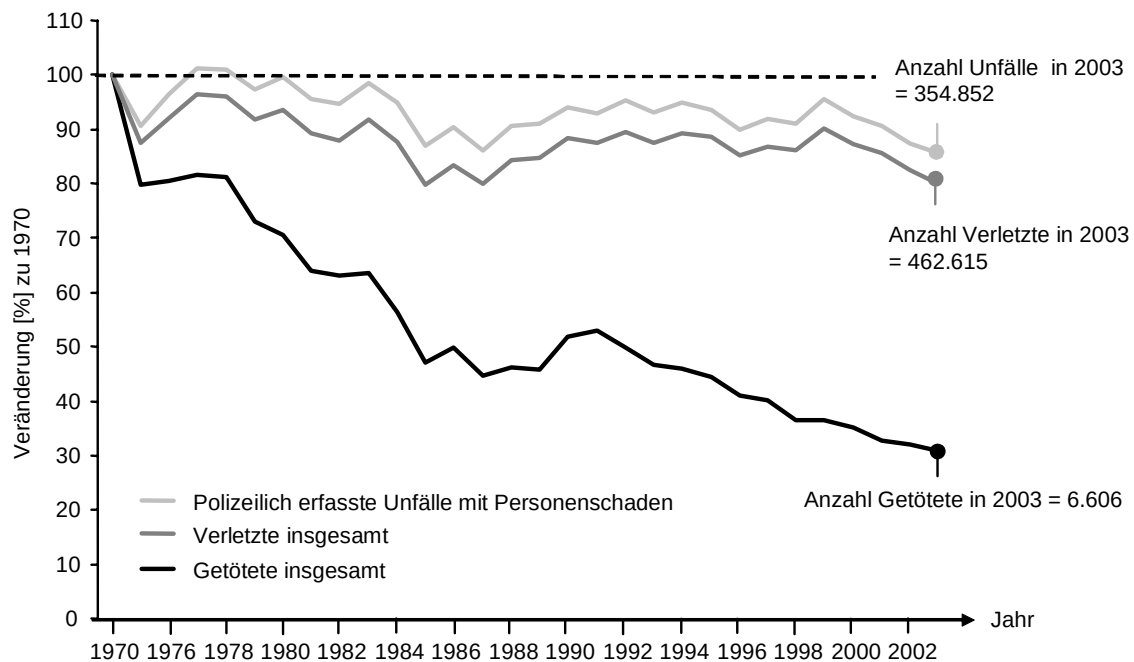


Bild 4: Relative Veränderung von polizeilich erfassten Unfällen und der darin verletzten und getöteten Personen bezogen auf 1970 nach Daten des Statistischen Bundesamtes

Bild 5 zeigt die Verteilung der im Jahr 2003 getöteten Verkehrsteilnehmer nach Art der Verkehrsbeteiligung. Fahrer von Personenkraftwagen stellen mit ca. 60% der Unfälle mit Getöteten den unangefochten größten Teil. Nach den Daten des Statistischen Bundesamtes sterben circa drei Viertel aller Straßenverkehrstoten bei Unfällen, die sich außerhalb der Stadtgrenzen ereignen.

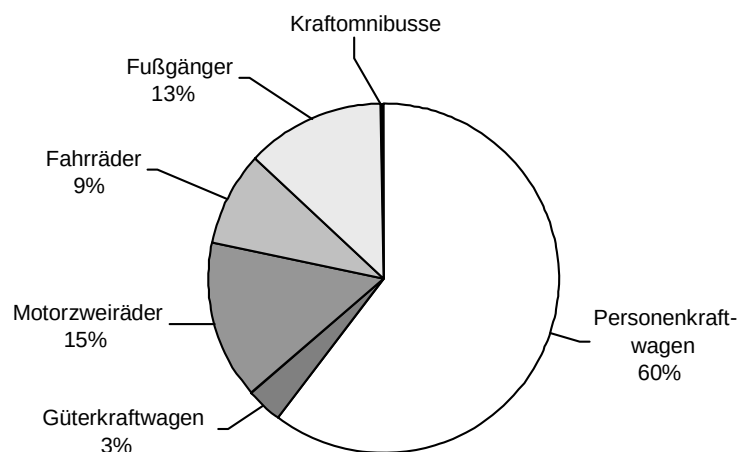


Bild 5: Getötete Personen im Jahr 2003 nach Art der Verkehrsbeteiligung nach Daten des Statistischen Bundesamtes

Setzt man diese Zahlen nun mit den zu den Straßenkategorien gehörigen Fahrleistungen in Beziehung, zeigt der Kennwert Getötete je Mrd. Fahrzeugkilometer, dass das Risiko,

auf Autobahnen (BAB) tödlich zu verunglücken, sogar niedriger ist als innerorts. Im Jahr 1996 beispielsweise verunglückten innerorts 1.403, außerorts (ohne BAB) 3.955 und auf BAB 768 Personen tödlich. Zusammen mit der Fahrleistung für diese Ortslagen (innerorts 130,3 Mrd. Fzg.-km; außerorts (ohne BAB) 216,7 Mrd. Fzg.-km; BAB 160,0 Mrd. Fzg.-km) ergibt sich so der Risikokennwert von Getöteten je Mrd. Fzg.-km zu 10,8 Personen innerorts, 18,3 Personen außerorts (ohne BAB) und 4,8 Personen für BAB.

Mobilität und deren negative Folgen sind selbstverständlich kein auf Deutschland begrenztes Phänomen. Ein Blick über die Landesgrenzen hinaus in die Länder der Europäischen Union ist deshalb notwendig.

Mortalitätsrate pro 100.000 Einwohner

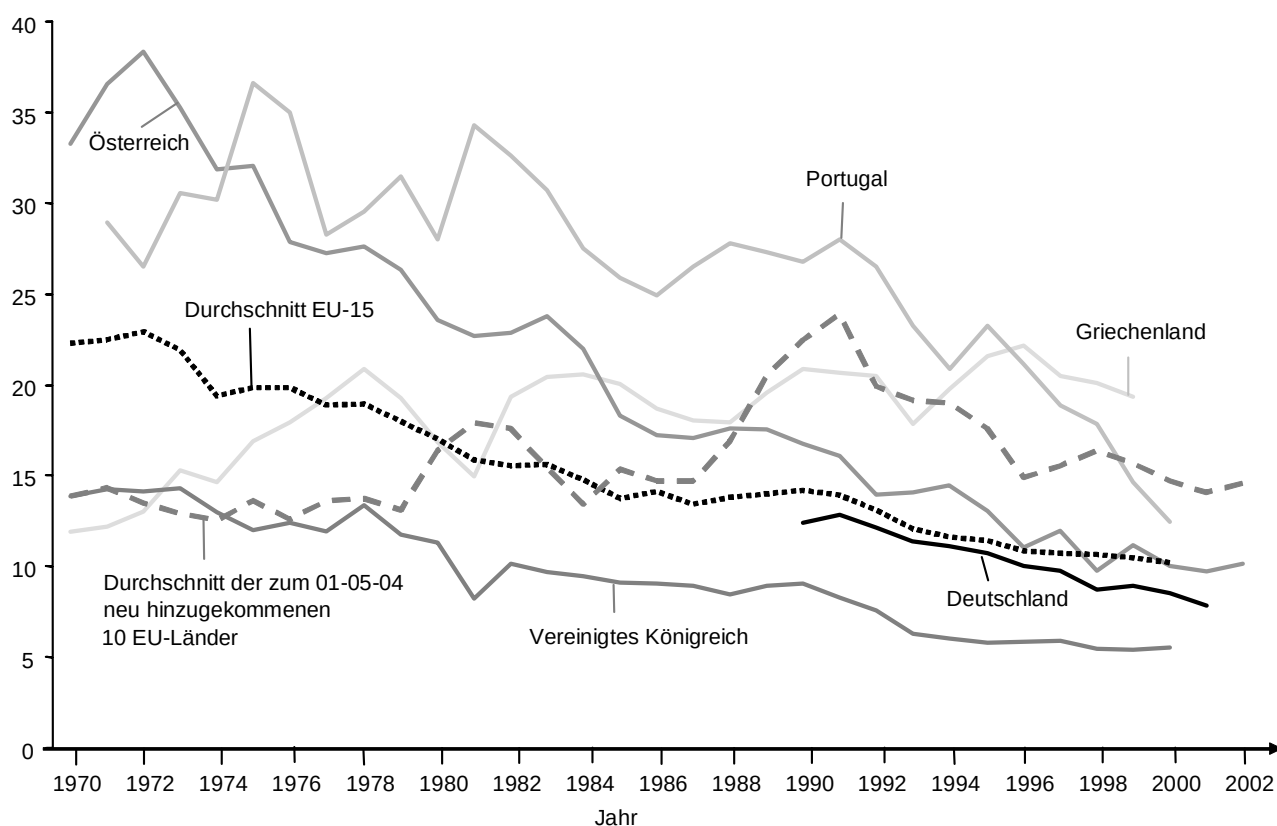


Bild 6: Mortalitätsraten aufgrund von Straßenverkehrsunfällen in ausgewählten Ländern der Europäischen Union im Vergleich zur durchschnittlichen Mortalitätsrate der EU-15-Länder und der zum Mai 2004 hinzugekommenen zehn EU-Länder

Die internationale Vergleichbarkeit der Verkehrsunfallstatistiken hängt dabei von vielen Faktoren ab. So sind Angaben über Todesfälle zuverlässiger als Angaben über Verletzte oder über Unfallbeteiligte. Die Anzahl der Todesfälle muss, damit sie zwischen verschiedenen Ländern vergleichbar ist, eine Bezugsgröße haben. Neben der Anzahl der Fahrzeuge, den Kilometerleistungen und der Länge des Straßennetzes wird die Anzahl der Einwohner dafür am häufigsten herangezogen [30]. Um den Einfluss unterschiedlicher Altersstrukturen in den verschiedenen Ländern auszugleichen, werden standardisierte

Sterberaten berechnet, bei denen die Altersverteilung jeweils auf eine Standardverteilung gewichtet ist. Das Regionalbüro Europa der Weltgesundheitsorganisation „World Health Organisation (WHO)“ hat mit der „Health for All - Mortality Database“ eine frei verfügbare Datenbank erstellt, die für zahlreiche Todesursachen standardisierte Sterberaten angibt [131]. Diese wurde vom Autor der vorliegenden Arbeit ausgewertet. Bild 6 zeigt als Ergebnis nun die standardisierte Mortalitätsrate für Straßenverkehrsunfälle verschiedener europäischer Länder

In der Europäischen Union hat sich die Rate der im Straßenverkehr getöteten Personen pro 100.000 Einwohner von ungefähr 23 pro Jahr in den frühen 70er Jahren auf rund 11 im Jahr 1999 etwa halbiert [30]. Der Erfolg war nicht in allen europäischen Ländern gleich groß. Im Vergleich der Mortalitätsraten für Straßenverkehrsunfälle mit anderen europäischen Ländern nimmt Deutschland einen Platz im Mittelfeld ein. Großbritannien und Schweden zeigen die geringsten Mortalitätsraten, Portugal und Griechenland zeigen eine Mortalitätsrate, die deutlich über dem Durchschnitt der Länder der Europäischen Union liegt. Die absoluten Werte in den Unfallstatistiken, d.h. über 40.000 Verkehrstote und mehr als 1,2 Millionen Verletzte pro Jahr in der EU, und die Betrachtung des Durchschnitts der zum 1. Mai 2004 hinzugekommenen zehn neuen Beitrittsländer zeigt zudem, dass aus gesellschaftlichem Interesse noch erhebliche Maßnahmen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit notwendig sind.

2.1.2 Effekt passiver Sicherheit

Wie die vorangehenden Ausführungen zeigen, nimmt das Risiko, bei einem Verkehrsunfall lebensbedrohliche Verletzungen zu erleiden, stetig ab. Die weitgehend positive Entwicklung in vielen europäischen Staaten, darunter auch der Bundesrepublik, ist in einer Vielzahl von Ursachen begründet. Dazu gehören neben Verbesserungen im Straßenbau, der Verkehrsregelung und der Rettungsketten, neben einer anderen Verkehrsstruktur sowie einer weitgehenden Trennung von Fußgängern, Zweiradfahrern und Kraftfahrzeugen besonders die Anstrengungen der Fahrzeugindustrie, die passive Sicherheit in ihren Fahrzeugen zu erhöhen.

Wie groß die Fortschritte auf dem Gebiet sowohl des Pkw-Insassenschutzes wie auch bei Unfällen mit Fußgängern sind, veranschaulichen Bild 7 und Bild 8. Nach einer eigenen Auswertung des Autors der in der GIDAS⁴-Datenbank hinterlegten Unfalldaten ist das Risiko, bei einem Verkehrsunfall erhebliche Verletzungen zu erleiden, abhängig vom Baujahr des beteiligten Fahrzeugs. Das gilt sowohl für die Insassen des Fahrzeugs unabhängig vom Kollisionspartner als auch für Fußgänger, die bei einem Fußgängerunfall mit einem

⁴ GIDAS steht für **G**erman **I**n **D**epth **A**ccident **S**tudy; Erklärung siehe Kapitel 3.1

Pkw kollidieren. Die Verletzungsschwere wird dabei mit Hilfe des MAIS⁵ codiert. Je höher der MAIS-Wert, desto schwerer die Verletzung. Bei einem MAIS von 4 beträgt die Letalitätsrate der verletzten Person ca. 15%, bei einem MAIS von 5 ca. 60% und bei einem MAIS von 6 ca. 99% [116]. Vergleicht man die unfallbeteiligten Fahrzeuge der Baujahre 1985 bis 1990 mit denen der Baujahre 1996 bis 2000, so nimmt mit jüngerem Baujahr der Anteil von Verletzungen mit MAIS 6 bei den Insassen um 25% und bei verunfallten Fußgängern um 65% ab. Das heißt, je jünger ein Fahrzeug ist, desto geringer ist das Risiko für die Beteiligten eines Verkehrsunfalls, schwere oder gar tödliche Verletzungen zu erleiden.

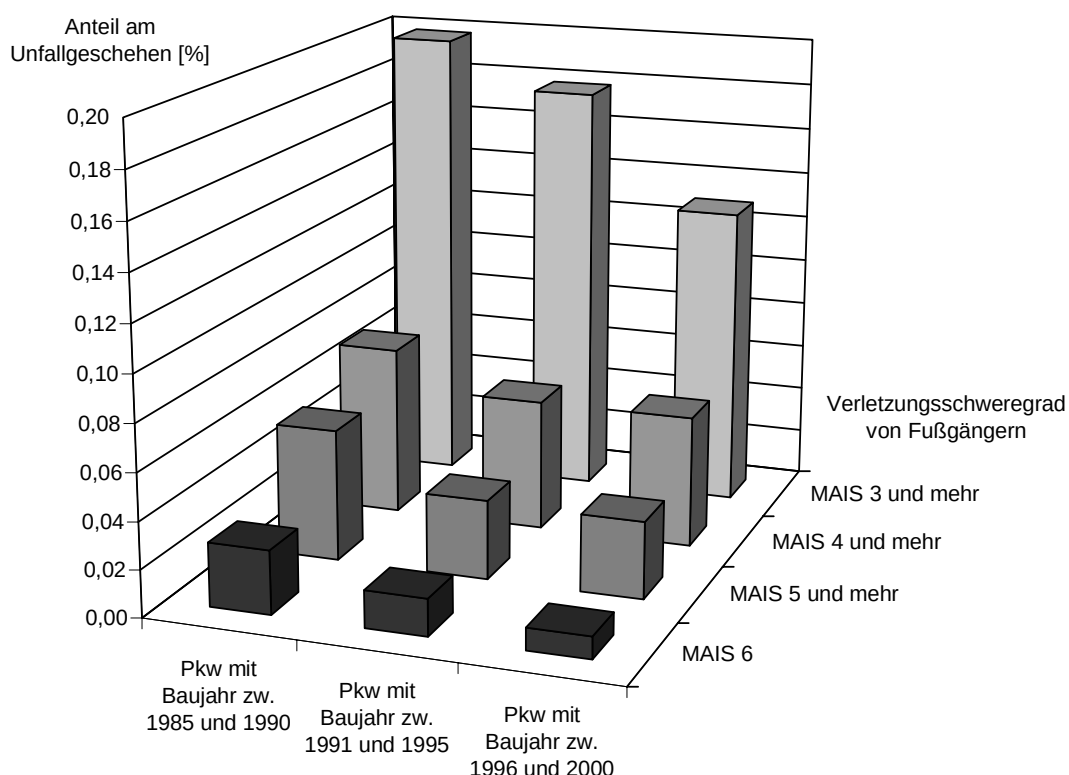


Bild 7: Eintrittswahrscheinlichkeit verschiedener Verletzungsschweregrade bei Kollisionsunfällen mit Fußgängern in Abhängigkeit des Baujahrs des beteiligten Fahrzeugs

⁵ Der MAIS (**M**aximum **A**bbreviated **I**njury **S**cale) beschreibt die Verletzungsschwere der schwersten Verletzung einer Person über alle Körperregionen. Jede Einzelverletzung wird mit einer AIS (**A**bbreviated **I**njury **S**cale) bewertet. Es führen beispielsweise zu einem AIS 1 („leicht verletzt“): Schürfung, Prellung, Rippenbruch; zu AIS 2 („mäßig verletzt“): leichte Gehirnerschütterungen ohne Bewusstlosigkeit, Rippenbruch von 2 bis 3 Rippen, geschlossener Armbruch; zu AIS 3 („ernstlich verletzt“): offene Wunden mit Nerven und Gefäßverletzungen, Gehirnerschütterungen mit Bewusstlosigkeit; zu AIS 4 („schwer verletzt“): Wunden mit gefährlichen Blutungen, multiple Frakturen mit Organschädigungen, Gehirnerschütterung mit neurologischen Zeichen; zu AIS 5 („kritisch verletzt“): Organrupturen, schweres Schädeltrauma, Verbrennungen 3. Grades; zu AIS 6 („nicht behandelbar“): massive Kopf- oder Brustquetschungen

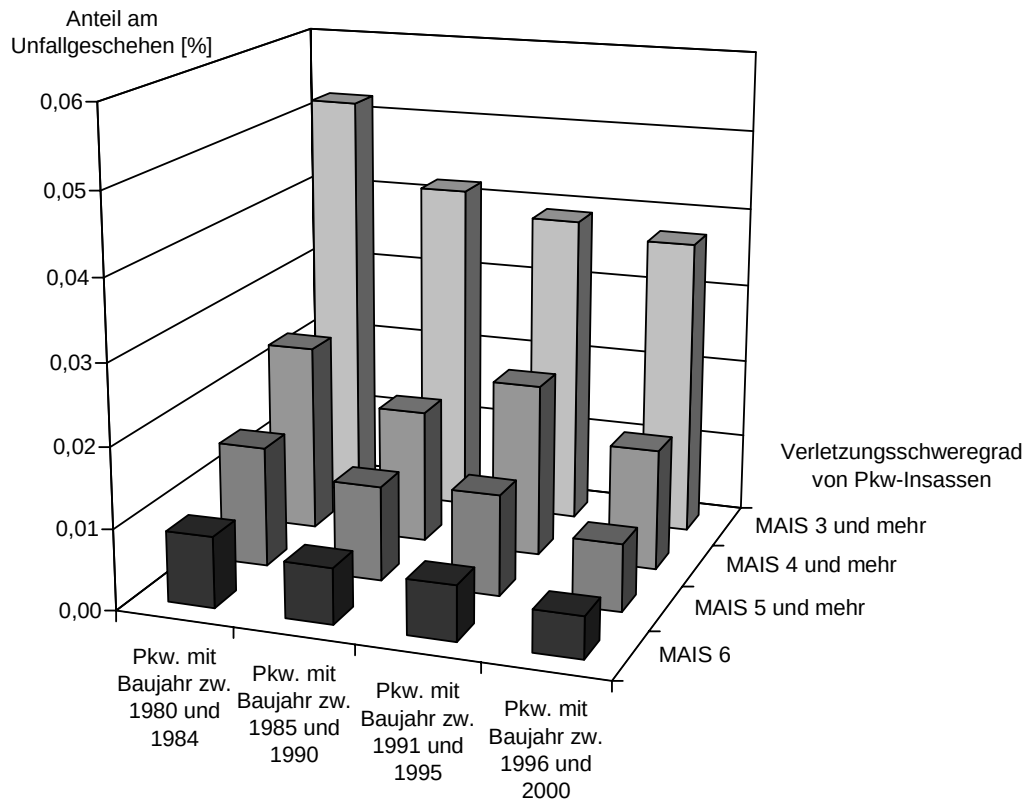


Bild 8: Eintrittswahrscheinlichkeit verschiedener Verletzungsschweregrade bei Unfällen von PKW-Insassen in Abhängigkeit des Baujahrs des beteiligten Fahrzeugs

Zu der Entwicklung, wie wir sie hier feststellen, hat in einem großen Maße die Einführung passiver Sicherheitssysteme beigetragen. Maßnahmen zur Steigerung der passiven Sicherheit, wie zum Beispiel verbesserte unfallenergieaufnehmende Strukturen der Fahrzeuge, Sicherheitsgurte und Airbags gehören seit Jahren zum Serienausstattungsumfang moderner Kraftfahrzeuge. Sie wirken primär unfallfolgemindernd. Sie reduzieren im Falle eines Unfalls die Unfallfolgen der Passagiere, aber auch im Sinne des „Partnerschutzes“ die Unfallfolgen anderer eventuell beteiligter Verkehrsteilnehmer. Dass hier nach wie vor dringender Handlungsbedarf besteht, haben sowohl Fahrzeughersteller als auch der Gesetzgeber erkannt. Zudem ist das Thema Sicherheit auch in das Problembewusstsein der Automobilkäufer gerückt, die, sensibilisiert durch die Veröffentlichungen von Unfalltests und Fahrversuchen, das Sicherheitsniveau eines Fahrzeugs verstärkt in ihre Kaufentscheidung mit einbeziehen.

Aufgrund des derzeit verfügbaren hohen passiven Sicherheitsniveaus moderner Fahrzeuge und der aktuellen Marktdurchdringung ist zu vermuten, dass von der weiteren Verbesserung passiver Maßnahmen, d.h. dem Ansatz, bei unabwendbarer Unfallentstehung die Unfallfolgen zu mildern, keine Quantensprünge in der Reduzierung der Unfalltoten mehr zu erwarten sind. Deshalb scheint es notwendig, die bisherige Konzentration auf passive Sicherheitsmaßnahmen um einen aktiven Ansatz zu ergänzen. Es gilt, Unfälle im Vorfeld zu vermeiden, und falls sie nicht vermeidbar sind, diese beispielsweise durch Reduzierung

der Unfall- bzw. Kollisionsgeschwindigkeit oder durch Optimierung der Anprallwinkel und des Kollisionsverlaufs die Unfallschwere zu verringern. Das sind die Ziele „aktiver Sicherheit“

2.1.3 Möglichkeiten aktiver Sicherheit

In den Industrieländern werden überregionale und globale Arbeitsteilung, neue Dienstleistungen, der Einsatz neuer Kommunikations- und Informationsmedien sowie hohe Mobilitätsanteile an der Freizeitgestaltung zu einem weiteren Wachstum der individuellen Mobilitätsnachfrage führen. In den Entwicklungs- und Schwellenländern wird der motorisierte Straßenverkehr in Verbindung mit der fortschreitenden Industrialisierung deutlich zunehmen. Der Güterverkehr nimmt weiterhin überproportional zu, da der Stückgutverkehr weiter globalisiert wird. Das Bundesverkehrsministerium rechnet bis 2015 mit einem Wachstum um 64% gegenüber der Güterverkehrsleistung 1997 in Deutschland, während für den Personenverkehr im gleichen Zeitraum ein Wachstum um 20% erwartet wird. Trotz zunehmendem Verkehr und steigender Komplexität der Verkehrsabläufe muss die Zahl der Unfälle und insbesondere der Verkehrstoten deutlich reduziert werden. Die Europäische Kommission hat sich im Weissbuch „Die europäische Verkehrspolitik bis 2010: Weichenstellung für die Zukunft“ zum Ziel gesetzt, die Zahl der Verkehrstoten zwischen 2000 und 2010 zu halbieren [29]. Eine Harmonisierung der Sanktionen und die Förderung neuer Technologien sollen dies möglich machen. Gegebenenfalls will die Kommission zur Erreichung dieses Zieles auch gesetzgeberische Maßnahmen vorschlagen.

Bereits heute sind beispielsweise anhand der Fahrdynamikregelung (FDR)⁶ die Möglichkeiten aktiver Sicherheitstechnologien abzusehen. Nach einer Untersuchung von Mercedes Benz ist seit der serienmäßigen Einführung der Fahrdynamikregelung in den ersten fünf Jahren der Anteil der Fahrunfälle, bei denen die Autofahrer die Kontrolle über ihr Fahrzeug verlieren, schleudern und von der Fahrbahn abkommen an den Unfalltypen neu zugelassener Modelle deutlich zurückgegangen [81]. Die Volkswagen-Sicherheitsforschung stellte in einer Untersuchung von 21.000 Unfällen fest, dass der Anteil von Schleuderunfällen von vormals 30% auf 5% zurückgegangen ist. Damit leistet die elektronische Stabilisierung mehr für die Fahrzeugsicherheit als Airbags und ist nach dem Sicherheitsgurt die effizienteste Sicherheitsmaßnahme [86]. Obwohl zahlreiche, deutsche Fahrzeughersteller aktuell den Großteil ihrer Produktpalette mit einer Fahrdynamikregelung ausrüsten, vergehen vermutlich noch einige Jahre, bis der Verlauf der Ausstattungsquote mit dem System sich, über alle im Gebrauch befindlichen Fahrzeuge gesehen, einem Sättigungswert annähert. Damit wird auch die nächsten Jahre ein stetig positiver Einfluss der Fahrdynamikregelung auf die Unfallzahlen erkennbar sein. Analog zu diesem Beispiel kann jedes neu eingeführte Sicherheitssystem damit, einen hohen technischen Reifegrad und eine fahreroptimierte Auslegung vorausgesetzt, in den Jahren nach Markt-

⁶ Auch unter der Bezeichnung „Elektronisches Stabilitäts-Programm (ESP)“, „Fahrstabilitätsregelung (FSR)“ oder „Dynamic Stability Control (DSC)“ bekanntes System

Einführung einen stetig steigenden Einfluss auf die Verkehrsunfallzahlen erreichen, bis es schließlich aufgrund der gesättigten Marktdurchdringungsrate wiederum durch neue Ansätze ergänzt werden sollte.

Systeme der aktiven Sicherheit sind schon seit langem Kernthema von Forschungsinitiativen. Das europäische Projekt PROMETHEUS⁷ gilt als wegweisend auf diesem Gebiet. Innerhalb dieses Projektes wurden technologische Grundlagen für den Betrieb von „intelligenten Fahrzeugen“ auf „intelligenten Straßen“ erarbeitet. Dazu wurden erste Versionen von Abstands- und Geschwindigkeitsreglersystemen auf Basis von Radar- und Laserabstandssensoren erprobt. Weitere Aktivitäten betrafen die Entwicklung von Systemen zur Spurhalteunterstützung, die Beteiligten entwickelten beispielsweise Kamerasysteme zur Verfolgung der Fahrbahnrande.

Fast zeitgleich mit dem PROMETHEUS-Projekt wurde in den USA das Projekt PATH⁸ initiiert. Die Verkehrsverhältnisse in den USA stellen andere Anforderungen an Fahrerassistenzsysteme als in Europa. Fahrzeugübergreifende und/oder infrastrukturbasierte Lösungen werden im Vergleich zu fahrzeugautarken Lösungen bevorzugt behandelt. Deshalb untersuchten die Projektpartner unter anderem die geregelte Fahrt von Kolonnen mit fester Fahrzeuganzahl. Die Abstände der Fahrzeuge in Fahrtrichtung wurden mit radarbasierten Abstandsmessungen und einer Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation sichergestellt. Zur Querführungsregelung waren in der Mitte der Straße Stabmagneten eingelassen, die eine Messung der relativen Lage des Fahrzeugs zur Spur erlaubten. Das System ist allerdings nur funktionsfähig, wenn alle Fahrzeuge einer Spur auf diese Weise geregelt fahren.

1996 wurde als Initiative der Automobilindustrie das Forschungsprogramm MOTIV⁹ etabliert. Als Ziel galt, die Mobilität zu erhalten, gleichzeitig aber die unerwünschten Folgen des Verkehrs auf den Menschen und die Umwelt zu reduzieren. In Teilprojekten wurde beispielsweise an Abstandsregeltempomaten in Ballungsräumen gearbeitet. Hierfür wurden Voruntersuchungen zur Machbarkeit eines solchen Systems in verkehrsstärkeren Gebieten durchgeführt. Volkswagen präsentierte im Rahmen des Projektes einen Abbiege- und Spurwechselassistenten (ASA), wobei der Fokus auf dem Nachweis der technischen Machbarkeit, nicht auf der ergonomischen Gestaltung der Schnittstelle zum Fahrer lag.

In den Jahren 2002 bis 2005 arbeiteten Ingenieure und Forscher verschiedener Hersteller, Forschungsinstitute und Zulieferer innerhalb der Forschungsinitiative INVENT¹⁰ zusammen. Sie wurde Mitte 2001 vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) ins Leben gerufen und hat zum Ziel, die „Intelligenz“ in Einzelfahrzeugen dazu zu nutzen, den Verkehr der Zukunft sicherer und effizienter zu gestalten. Die Initiative stützt sich dabei auf Erfahrungen aus früheren Verbundprojekten wie PROMETHEUS und MOTIV und führt

⁷ PROMETHEUS steht für **PRO**gramm for a **E**uropean Traffic with **H**ighest **E**fficiency and **U**nprecedented **S**afety

⁸ PATH steht für **P**artner for **A**dvanced **T**ransit and **H**ighways

⁹ MOTIV steht für **MO**bilität und **T**ransport im **I**ntermodalen **V**erkehr

¹⁰ INVENT steht für **IN**teLLigenter **VE**rkehr und **N**utzergerechte **T**echnik (www.invent-online.de)

deren Ansätze inhaltlich fort. Zahlreiche Fahrzeughersteller arbeiten deshalb auf Initiative des BMBF daran, Fahrerassistenzsysteme zu entwickeln, die in Zukunft helfen, Unfälle zu vermeiden. Adressiert werden beispielsweise Systeme zur Unterstützung des Fahrers in Stau- und Kreuzungssituationen. Die vorliegende Arbeit ist durch Aktivitäten der AUDI AG innerhalb dieser Forschungsinitiative motiviert, der in dieser Arbeit thematisierte Querführungsassistent ein Ergebnis im Teilprojekt „Vorausschauende Aktive Sicherheit (VAS)“.

Die Automobilhersteller und Zulieferer arbeiten unter Hochdruck an Fahrerassistenzsystemen, seit nachgewiesen ist, dass neben den positiven Effekten auf die Verkehrssicherheit mit solchen Systemen auch Markenimage und Unternehmensumsatz positiv beeinflusst werden können. Trotz des Engagements sowohl der öffentlichen Hand als auch der Privatwirtschaft und trotz eindeutiger Zielvorgaben der Gesetzgebung zur Reduzierung der Unfallzahlen, werfen Fahrerassistenzsysteme produkthaftungsrechtliche und zulassungsrechtliche Fragen auf, die es den Automobilherstellern zurzeit noch nicht erlauben, Fahrerassistenzsysteme in breiter Front auf dem Markt zu platzieren.

2.2 Definition des relevanten Begriffsumfeldes

Im Folgenden werden die zum Verständnis dieser Arbeit notwendigen Begriffe „Längsführung“, „Querführung“, „Fahrzeugführung“, „Spurhalten“ und „Spurwechsel“ eingeführt und definiert, sowie der jeweilige Systemansatz des „Spurverlassenswarners“, der „Spurhalteunterstützung“, des „Spurwechselassistenten“ und des „Querführungsassistenten“ kurz erläutert.

2.2.1 Längsführung

Der Begriff der *Längsführung* umfasst alle Teilvorgänge, die zu einer Regulierung von Geschwindigkeit und Beschleunigung führen. Die Umsetzung des Längsführungswunsches erfolgt durch den Fahrer anhand der Stellglieder Gas, Bremse und Schaltung.

2.2.2 Querführung

Unter dem Begriff der *Querführung* werden alle Fahrvorgänge verstanden, die eine Aktion quer zur Fahrtrichtung des Fahrzeugs bedingen. Die Querführung erfolgt durch den Fahrer über das Lenkrad. Im Kontext dieser Arbeit beschränkt sich die Querführung auf die Spurhaltung und den Spurwechsel.

2.2.3 Fahrzeugführung

Der Vorgang der Fahrzeugführung kann als eine Kombination aus Längsführung und Querführung betrachtet werden. Im Sinne einer Problemreduktion kann die Fahrzeugführung auf den Ebenen Stabilisierung und Bahnführung nach KOPF in einem UND/ODER-

Graphen dargestellt werden [60]. Dazu wird die Fahraufgabe ausgehend von den beiden translatorischen Freiheitsgraden unter Vernachlässigung der Schaltvorgänge bis zur Betätigung der beiden Stellglieder Gaspedal und Bremse ausdifferenziert (siehe Bild 9).

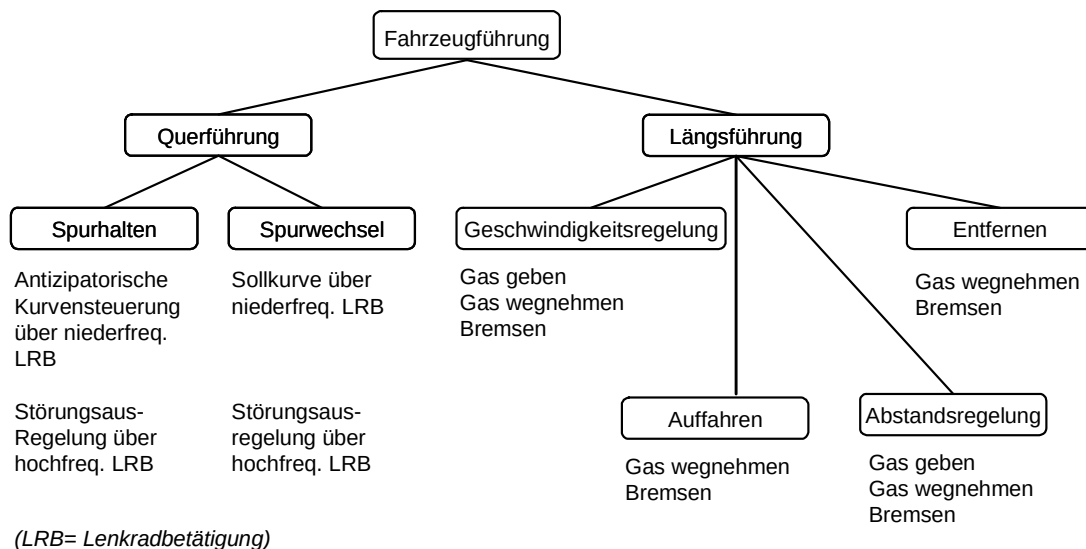


Bild 9: Problemreduktionsgraph zur Fahrzeugführung nach KOPF

Die Querführung kann nicht unabhängig von der Längsführung betrachtet werden kann. Die erfolgreiche Abarbeitung querführender Fahrmanöver kann Eingriffe in die Längsführung des Fahrzeugs notwendig machen (z.B. Beschleunigung beim Spurwechsel, um in Lücke auf der Nachbarspur zu „zielen“). Sowohl die Längs- als auch die Querführung erfolgt unter Berücksichtigung des zur Verfügung stehenden Verkehrsraumes.

2.2.4 Spurhalten

Unter Spurhalten versteht man die Tätigkeit zur Regulierung der lateralen Position mit dem Ziel, das Fahrzeug innerhalb der eigenen Fahrspur zu halten. Dazu führt der Fahrer auf fertigkeitbasierter Ebene korrigierende Lenkmanöver durch. Die Orientierung erfolgt anhand der Fahrbahnmarkierungen. Sind keine vorhanden, wird die Trajektorienwahl anhand der baulichen und verkehrlichen Gegebenheiten vollzogen.

2.2.5 Spurwechsel

Der Spurwechsel ist definiert als eine bewusste und beträchtliche Verlagerung der lateralen Position eines Fahrzeugs mit dem Ziel, eine Spur (Startspur) in Richtung einer angrenzenden Spur (Zielspur) zu verlassen [19]. Die Planung und Absicherung eines Spurwechselvorgangs führt der Fahrer auf regelbasierter Ebene durch, die Verfolgung der Soll-Trajektorie von der Start- auf die Zielspur erfolgt fertigkeitbasiert. Als Ego-Fahrzeug wird im Folgenden das Fahrzeug bezeichnet, das sich auf der Startspur befindet und dort entweder die Spur halten will oder den Spurwechsel initiieren und durchführen will. Als

Fremdfahrzeuge gelten alle anderen Fahrzeuge, die an dieser Verkehrssituation beteiligt sind.

2.2.6 Spurverlassenswarner

Zahlreiche wissenschaftliche Aufsätze und Mitteilungen von Fahrzeugherstellern und Systemanbietern thematisieren Ansätze verschiedener Systeme zur Unterstützung des Fahrers in querführenden Fahrmanövern. Spurverlassenswarner¹¹ adressieren Situationen, in denen der Fahrer beispielsweise aufgrund von Unachtsamkeit oder Ermüdungserscheinungen droht, die Fahrspur zu verlassen. Dabei werden je nach Systemvariante verschiedene Sensoren zur Detektion der Fahrspurmarkierungen bzw. verschiedene Kanäle und Signale zur Weitergabe der Systemaktion an den Fahrer verwendet (z.B. Sitzvibration, akustische Warnung in Form eines „Nagelbandratterns“). Das System agiert damit je nach Auslegung informierend oder warnend, ein unterstützender Eingriff ist der nachfolgend definierten Spurhalteunterstützung vorbehalten.

2.2.7 Spurhalteunterstützung

Neben der Spurverlassenswarnung werden auch Systeme entwickelt, die den Fahrer kontinuierlich in der Spurhaltung unterstützen. Die Systeme zur Spurhalteunterstützung¹² bestimmen permanent mit Hilfe eines Videosensors die relative Lage des Fahrzeugs innerhalb der Begrenzungslinien und greifen bei Abweichungen des Fahrzeugs durch gezielte Lenkaktionen korrigierend in die Fahrzeugführung ein.

2.2.8 Spurwechselassistent

Eine häufige Ursache für Spurwechsel-Unfälle ist das Übersehen von Fremdfahrzeugen oder Fehler bei der Einschätzung von Abstand und Geschwindigkeit herannahender Fahrzeuge auf der Zielspur. Durch die permanente Beobachtung der Nachbarnfahrspuren, insbesondere des rückwärtigen Bereichs hinter dem Fahrzeug, unterstützt der Spurwechselassistent¹³ den Fahrer bei Überhol- und Spurwechselvorgängen, indem er diesem Gefahrensituationen mit Hilfe angepasster Informations- bzw. Warnsignalen anzeigt.

¹¹ auch unter den Bezeichnungen „Lane Departure Warning (LDW)“, „Lane Departure Prevention Support System“, „Lane Warning Support (LWS)“, „Lane Guard System (LGS)“, „Spurverlassenswarner“ oder „Spurrandwarnsystem“ bekannt

¹² auch unter den Bezeichnungen „Heading Control“, „Lane Keeping Assist System (LKAS)“, „Lane Keeping Support“, „Lane Following Assistance System (LFAS)“, „Lane Trace Assist“, „Steering Assistance System (SAS)“, „Optische Spurhaltung“, „Spurhalteunterstützungssystem“ oder „Spurhalteassistent“ bekannt

¹³ auch unter den Bezeichnungen „Spurwechselwarner“, „Spurwechselassistent (SWA)“, „Lane Change Assistent (LCA)“ oder „Abbiege- und Spurwechselassistent (ASA)“ bekannt

2.2.9 Spurwechselunterstützung

Auch hoch automatisierte Systemansätze, in denen der Fahrer analog der Spurhalteunterstützung kontinuierlich über Lenkmomente bei der Spurwechseldurchführung unterstützt wird, sind denkbar und werden im Rahmen dieser Arbeit als Spurwechselunterstützung bezeichnet.

2.2.10 Querführungsassistent

Der Querführungsassistent (QFA) unterstützt den Fahrer bei der Spurhaltung und bei Spurwechseln. Der Querführungsassistent vereint die Funktionalität von Spurverlassenswarnung, Spurhalteunterstützung und Spurwechselassistenten in einem Systemansatz. Dieses System sichert hierzu die vom Fahrer gewollten Spurwechselmanöver ab. Zusätzlich verhindert es ein ungewolltes Abkommen des Fahrzeugs aus der Fahrspur, das seine Ursachen in einer Ablenkung oder in Ermüdungserscheinungen des Fahrers haben kann. Das System überwacht hierzu kontinuierlich den Straßenverlauf und die Bewegung des Fahrzeugs innerhalb der Spurbegrenzungen. Droht das Fahrzeug von der Spur abzukommen, agiert das System, um den Fahrer zu einer gefährdungsabwendenden Aktion zu motivieren. Zusätzliche Sensoren liefern Informationen aus der Fahrzeugumgebung. Dazu zählen auch Informationen über andere Verkehrsteilnehmer im Front-, Seiten- und Rückraum. So lassen sich Spurwechselmanöver absichern und mögliche Unachtsamkeiten des Fahrers können durch gezielte Warnungen ausgeglichen oder vermieden werden. Dazu werden im Rahmen dieser Arbeit Ansätze zur Systemfunktionalität und Konzepte zur Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle untersucht.

2.3 Mensch als Fahrzeugführer

Die Leistungsfähigkeit kaum eines anderen Systems ist abhängiger von seinem Bediener als das Automobil. Der Fahrer nimmt Informationen aus der Umwelt auf und setzt diese über Informationsverarbeitungsprozesse in eine Fahrhandlung um. Der Fahrer ist damit während der Fahrzeugbedienung Teil eines Mensch-Maschine-Systems. Den menschlichen Informationsverarbeitungsprozess zeigt Bild 10.

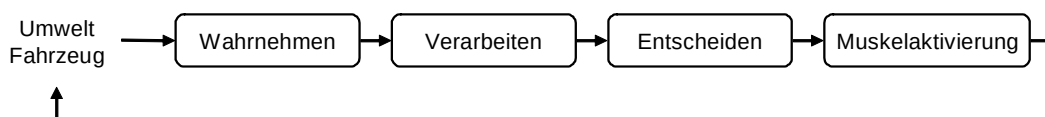


Bild 10: Informationsverarbeitungsprozess des menschlichen Fahrers

Die Entwicklung von elektronischen Systemen ist bislang in der Regel aus historisch-technischen und nicht grundsätzlich bedientechnischen Überlegungen erfolgt [13]. Im Re-

gelfall ist ein Autofahrer in der Lage, die wesentlichen Informationen aus seiner Umgebung auszuwählen, zu verarbeiten und in zuverlässige Entscheidungen und Fahrhandlungen umzusetzen. Dem Fahrer nun durch technische Lösungen eine größere Menge an Informationen zu bieten, ist nicht zielführend. Auf der einen Seite deshalb, weil bereits in herkömmlichen Fahrer-Fahrzeug-Systemen die Relevanz vieler Anzeigen und Bedienelemente fraglich ist. Zum anderen besteht damit die Gefahr, den Fahrer vom Verkehrsgeschehen abzulenken bzw. mit der Menge an Informationen zu überlasten [33]. Genauso wenig geht es aber darum, weniger Informationen anzubieten. Es reicht nicht aus, die einzelnen Informationsquellen ergonomisch zu gestalten und bediengünstig anzuordnen. Vielmehr muss die technische Gestaltungslösung auf den Informationsbedarf und die Verarbeitungskapazität des Fahrers abgestimmt werden. Deshalb scheint es sinnvoll, statt vom technisch Machbaren von den Fähigkeiten des bedienenden Menschen an die Problemlösung heranzugehen und die technischen Systeme aus der Sicht der psychologischen und physiologischen Eigenschaften des Menschen zu gestalten [13].

Die Mensch-Maschine-Interaktion muss sich, um die Verkehrssicherheit zu erhöhen, in einem hohen Maße aktiv und adaptiv gegenüber einer Variation sowohl der Verkehrssituation als auch der Fahrermerkmale verhalten. Das setzt eine genaue Analyse des Verhaltens des Fahrzeuglenkers und der Prozesse seiner Informationsverarbeitung voraus.

2.3.1 Einflussfaktoren

Der Fahrer hat das primäre Ziel, zum Zielort zu gelangen. Die Erreichung dieses Ziels verfolgt er jedoch nicht um jeden Preis. Eine bestimmte Ankunftszeit, Sicherheit, Wirtschaftlichkeit und Fahrkomfort stellen sekundäre Ziele dar [66]. Die Summe aller wahrgenommenen Umweltinformationen bildet die Verkehrssituation, auf die der Fahrer reagieren muss und die er selber mit beeinflusst [110]. Der Fahrer setzt diese äußeren Einflussfaktoren aus der ihn aktuell umgebenden Situation in die Bewegung seines Fahrzeugs um. Die Fahrzeugführung führt er dabei im Wesentlichen auf der Basis von Straßengeometrie bzw. Straßenmarkierungen, seiner Einschätzung der Straßeneigenschaften, seiner Erfahrung über das Verhalten seines Fahrzeugs, der Interpretation von Verkehrszeichen und der Position und Geschwindigkeit der anderen Verkehrsteilnehmer durch [71]. Die Informationen der Umwelt stammen deshalb vorrangig vom Fahrraum bzw. von der Straße, anderen Verkehrsteilnehmern und der Beschilderung [110].

Die Art und Weise, wie und in welchem Maße der Fahrer die Fahrzeugführung gestaltet, ist abhängig von zusätzlichen physiologischen wie psychologischen Faktoren, die die Ziele und deren Gewichtung beeinflussen. Der Fahrer setzt dabei intrinsische¹⁴ wie extrinsische¹⁵ Faktoren zu einem persönlichen Fahrverhalten zusammen (siehe Bild 11).

¹⁴ *von innen kommend*, der Auslöser ist die Person selbst

¹⁵ *von außen kommend*, außerhalb der betrachteten Person liegend. Eine extrinsische Handlung ist fremdbestimmt, sie wird von außen ausgelöst.

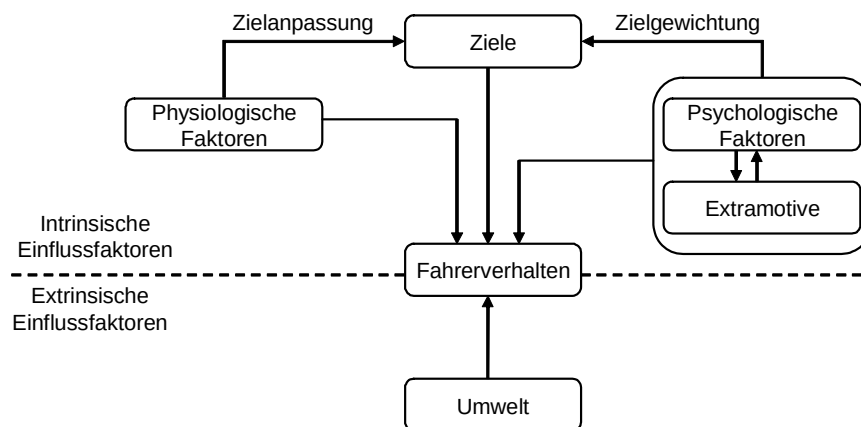


Bild 11: Einfluss intrinsischer und extrinsischer Faktoren auf das Fahrerverhalten

Der Fahrerzustand wird durch intrinsische Faktoren determiniert. Das daraus resultierende Fahrverhalten wird als Fahrstil bezeichnet. Die intrinsischen Faktoren unterteilt man in kurzfristig einwirkende oder überdauernde Faktoren. Der aus den überdauernden Faktoren resultierende Fahrstil bestimmt das Fahrernormalverhalten. Aufgrund seiner Abhängigkeit von zeitlich nur gering veränderlichen Größen kann man davon ausgehen, dass sich das Fahrernormalverhalten nur über sehr lange Zeiträume ändert [60]. Die Tabelle 1 zeigt die intrinsischen Einflussfaktoren auf das Fahrverhalten [54].

Tabelle 1: Intrinsische Einflussfaktoren auf das Fahrverhalten nach IRMSCHER

	Überdauernde Faktoren	Kurzfristig einwirkende Faktoren
Physiologische Faktoren	Reaktionszeit Körperliche Fähigkeit Sensorische Defekte Alterserscheinungen	Müdigkeit Alkohol Drogen Giftgase Menstruation und Schwangerschaft Körperliche Krankheit
Psychologische Faktoren	Psychomotorische Geschicklichkeit Fahrerisches Geschick und Gewohnheit Psychische Störungen Soziale Anpasstheit Persönlichkeit und Einstellungen Intelligenz	Müdigkeit Gefühlslage Ablenkung

Das Normalverhalten ist aber neben den kurzfristig einwirkenden Faktoren auch von Motiven überlagert, die zu einer vergleichsweise schnellen Verhaltensänderung führen können und die mit den beobachteten Verhaltensvariationen bei Autofahrern in Zusammenhang stehen. NÄÄTÄNEN & SUMMALA verstehen als so genannte Extramotive den Fahrspaß, Geltungsdrang, Selbstbestätigungsdrang sowie das Risiko um des Risikos Willen [77]. UTZELMANN identifiziert durch Studien über Erlebensformen und Motive bei der Verkehrsteilnahme zahlreiche übergeordnete Einflussfaktoren [122]. Neben der Herausforde-

rung durch Fahren im Grenzbereich („Thrill“) und der Sicherheit und Entspannung durch ruhiges Fahren („Gleiten“) führt er als Motiv auch das Vergnügen an gekanntem und perfektem, regelgerechtem und gelassenem Fahren („Pilotieren“) an. Daneben gelten aber auch das Rivalisieren und die Konkurrenz („Erproben“) sowie die Demonstration der Stärke des eigenen Fahrzeugs („Kraftentfaltung“) als Triebfedern des Fahrers. Aus dem „heuristischen“ Autofahrerwissen kann dieser Motivationskatalog noch durch weitere Faktoren wie Eile, Angst, Frustration, Aggression und Bequemlichkeit komplettiert werden, die ebenfalls Entsprechungen in den Grundmotiven haben und die nach Tabelle 2 Auswirkungen auf das Fahrverhalten haben [54].

Tabelle 2: Auswirkungen bestimmter Motive auf das Fahrverhalten nach IRMSCHER

Motiv	Verhaltensänderung
Frustration	unberechenbares Verhalten, aber kooperativ (kooperativ ist zu verstehen als defensiver, betont partnerschaftlicher Fahrstil)
Spaßerleben	verminderte Leistung und Aufmerksamkeit, Nebenaktivitäten
Eile	höhere und unregelmäßige Geschwindigkeit, mehr Überholvorgänge, höhere Aktiviertheit und Konzentration, kontinuierliche Strategie, wenig kooperativ, wenige Nebenaktivitäten
Risikovermeidung	geringe Geschwindigkeit, großer Abstand, wenige Nebenhandlungen, sehr kooperativ
Machtstreben, Wettbewerb	hohe Geschwindigkeit, wenig kooperativ, geringe Abstände, wenig konzentriert, viele Nebenhandlungen
Aggression	dichtes und schnelles Auffahren, blinken, schneiden, kommunikativ, aber unkooperativ
Erprobung eigener Fähigkeiten	hohe Geschwindigkeit, hohe Konzentration, geringe Abstände, nicht kommunikativ, aber kooperativ

Die Auswirkungen der intrinsischen Faktoren betreffen alle kognitiven Ebenen, wobei einige Faktoren sich sofort bestimmten kognitiven Prozessen zuordnen lassen (z.B. sensorische Defekte oder psychomotorische Geschicklichkeit). Im Gegensatz dazu lassen sich einige psychologische Faktoren (z.B. Gefühlslage, Persönlichkeit) schwer zuordnen und wirken auf verschiedenen Ebenen menschlichen Verhaltens. Unglücklicherweise sind die intrinsischen Faktoren einer Messung im Fahrzeug nur schwer oder gar nicht zugänglich. Das macht deren Modellierung nahezu unmöglich und erschwert eine Berücksichtigung bei der Auslegung eines Assistenzsystems. Die unterschiedlichen Motive führen allerdings nach Ansicht einiger Autoren tatsächlich zu beobachtbarem Verhalten. Vor allem die Vorhersage des Geschwindigkeitsverhaltens ist aus dem Ausprägungsgrad dieser Motivvariablen in hohem Maße möglich. Auch umgekehrt kann aus den beobachteten Verhaltensmerkmalen auf ein zugrunde liegendes Motiv geschlossen werden [122]. Der in Kapitel 6.5 vorgestellte und im Rahmen eines Fahrversuchs validierte Ansatz hat beispielsweise zum

Ziel, die Spurwechselmotivation eines Fahrers anhand seines charakteristischen Verhaltens in speziellen Verkehrssituationen zu berechnen.

2.3.2 Aufgaben

Das Steuern eines Kraftfahrzeuges kann, analog der Betätigung einer Maschine, als eine Regelung aufgefasst werden [13]. Der Verlauf der Straße und die anderen Verkehrsteilnehmer bestimmen neben Umweltbedingungen die Führungsgröße und damit die Fahraufgabe. Als Ergebnis der Regelung werden die seitliche Sollposition des Fahrzeugs auf der Straße sowie die Geschwindigkeit festgelegt. Bild 12 verdeutlicht, dass der Fahrer mit seinen Teilaufgaben Informationsaufnahme („IA“), Informationsverarbeitung („IV“) und Informationsumsetzung („IU“) neben dem Fahrzeug und der Fahrzeugdynamik den essentiellen Teil des Regelkreises darstellt.

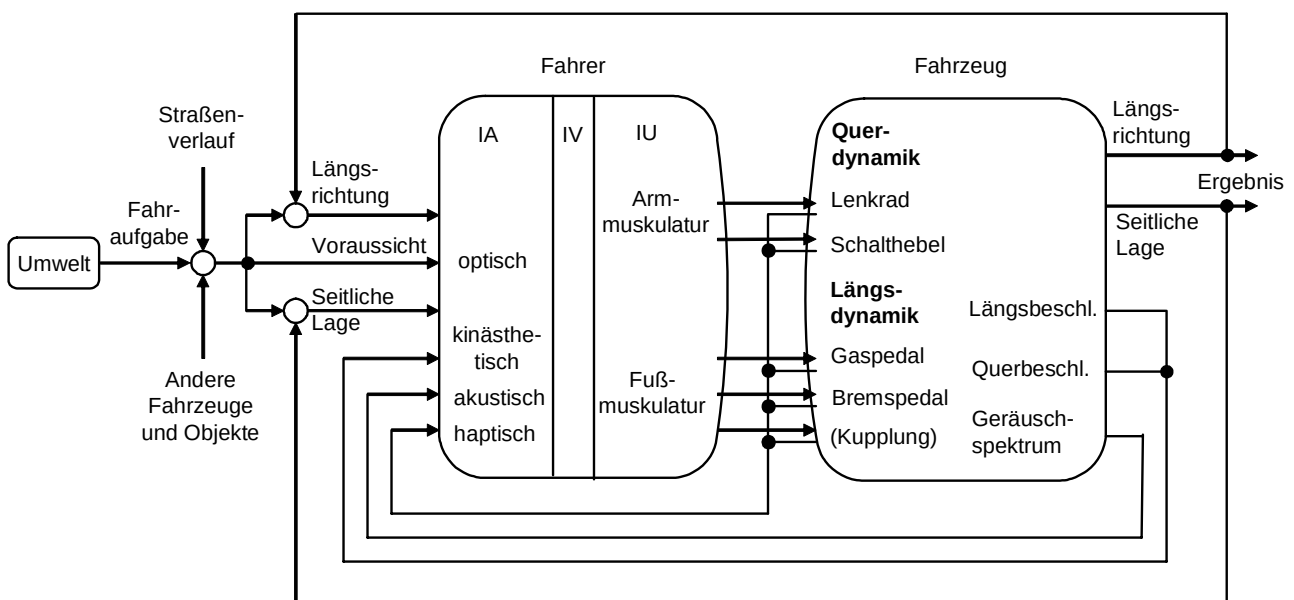


Bild 12: Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis nach BUBB

Der Fahrvorgang kann als eine hierarchisch aufgebaute, zielgerichtete Tätigkeit aufgefasst werden, die sich aus einzelnen Handlungen, Teilhandlungen und Bewegungen zusammensetzt. Als Handlungen fungieren dabei die einzelnen Fahrsituationen. Die in der Verkehrspsychologie verwendete Beschreibung von Fahraufgaben setzt häufig am Dreiebenen-Modell der Fahrzeugführung an, das sich besonders im Zusammenhang mit Assistenzsystemen einer großen Beliebtheit erfreut [25]. Es ist in Bild 13 dargestellt.

In diesem Modell unterteilt sich die Fahraufgabe in die Aufgaben von „Navigation“, „Bahnführung“ und „Stabilisierung“. Auf der Navigationsebene legt der Fahrer seine Fahrtroute fest und verfolgt diese während der Fahrt. Die Festlegung erfolgt in vielen Fällen bereits vor Antritt der Fahrt und bezieht in der Regel neben vorhandenen oder durch Kartenmaterial verfügbaren Kenntnissen über das Straßennetz auch die globale Verkehrssituation mit

ein. Unter Berücksichtigung der Belastung und -soweit bekannt- des „Widerstands“ einzelner Streckenabschnitte beispielsweise durch Geschwindigkeitsbeschränkungen, Knotenpunkte oder Baustellen wird nach einer bestimmten Strategie (so z.B. möglichst schnell, möglichst sicher, möglichst einfach) die Route festgelegt. Während der Fahrt erstreckt sich die Navigationsaufgabe dann auf die Wahrnehmung der notwendigen Informationen zur Einhaltung der Route und gegebenenfalls auf eine Anpassung aufgrund geänderter Randbedingungen. Die Umsetzung der geplanten Fahrtroute findet auf der Bahnführungsebene statt. Der Fahrer legt dazu in einem unmittelbaren Umfeld unter Berücksichtigung des von ihm wahrgenommenen Straßenverlaufs und des umgebenden Verkehrs in Ort und Zeit einen gewünschten Kurs fest, wie sich das Fahrzeug bewegen soll [13]. Die Bahnführung schließt damit Teilaufgaben wie die Spurhaltung, das Folgefahren und das Überholen ein und wird üblicherweise in die Quer- und in die Längsführung unterteilt. In der Stabilisierungsebene schließlich findet die Umsetzung der Zielgrößen des Fahrerwunsches in Bezug auf Quer- und Längsführung in die Fahrzeugbewegung statt. Die Fahrzeugführung wird durch die fahrzeugseitigen Stellgrößen wie Lenkbewegung, Gaspedal, Bremse und Gangschaltung gesteuert. Das übergeordnete Ziel dieser Ebene in der Fahraufgaben-Hierarchie ist die Stabilität des Fahrzeugzustandes. Voraussetzung für die Fahrerhandlung ist die Wahrnehmung der Straßenoberfläche, des Straßenverlaufs und des aktuellen eigenen Fahrzustandes durch den Fahrer [125].

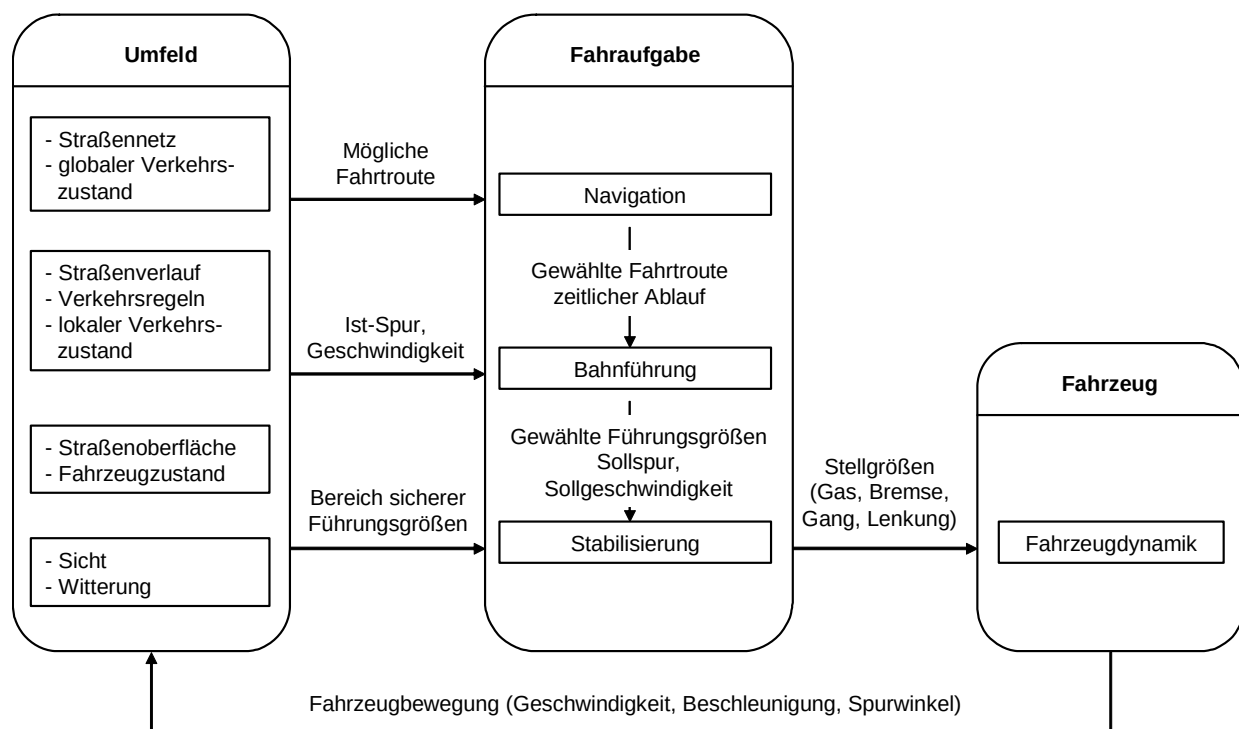


Bild 13: Drei-Ebenen-Modell der Fahrzeugführung nach DONGES

Diese drei Fahraufgabenebenen besitzen verschiedene Zeitkonstanten, unterschiedliche Priorität und unterschiedliche Häufigkeiten, in denen sie abgearbeitet werden [125]. Die Vorgänge auf den Hierarchieebenen finden alle während der Fahrt und parallel statt. Über-

geordnete Ebenen beeinflussen die darunter liegenden Ebenen und umgekehrt [66]. Es ist offensichtlich, dass es dabei zu Konflikten kommen kann. Erfordert die Verkehrssituation augenblicklich eine hohe Regeltätigkeit, kann es vorkommen, dass der Fahrer die Aufgaben einer der höheren Ebenen vernachlässigt und beispielsweise auf der Führungsebene ein anderes Fahrzeug übersieht.

Die vorgestellten Modelle beziehen sich ausnahmslos auf die Hierarchisierung bzw. Strukturierung der primären Fahraufgabe, die aus dem eigentlichen Fahrprozess besteht. Daneben sind aber vom Fahrer noch Aufgaben zu erledigen, die zwar im Rahmen der Fahraufgabe verkehrs- und umweltbedingt anfallen, die aber nicht dem eigentlichen Führen des Fahrzeugs dienen. Beispiele für diese so genannten sekundären Aufgaben sind die Betätigung des Blinkers, des Wischers oder des Lichtschalters sowie gegebenenfalls auch die Bedienung des Tempomat oder eines ACC¹⁶-Systems. Die Aufgaben des Fahrers haben sich in den letzten Jahrzehnten außerordentlich gewandelt und neben der primären und sekundären Fahraufgabe kam im Zusammenhang mit verschiedenen Komfort- und Multimediafunktionen eine Fülle an Nebenaufgaben hinzu. Diese tertiären Aufgaben stehen nicht mit der Fahraufgabe in Verbindung, sondern dienen lediglich dem Zufriedenstellen des Komfort-, Unterhaltungs- oder Informationsbedürfnisses [13]. Es besteht die Gefahr, dass mit dem Einzug zusätzlicher Systeme beispielsweise auch der Assistenzsysteme der Aufwand zur Abarbeitung der damit systeminduzierten Aufgaben zur Bedienung und/oder Einstellung überhand nimmt.

2.3.3 Informationsverarbeitung

Alle Modelle zur Beschreibung der menschlichen Informationsverarbeitung machen entweder explizit oder implizit eine Unterscheidung zwischen einem kontrollierten, bewussten Prozess und einem automatischen bzw. unbewussten Prozess. Alle kognitiven Aktivitäten werden durch das Wechselspiel einer dieser beiden Modi kontrolliert und beide Handlungskonzepte führen auch zu unterschiedlichen Fehlertypen. Der kontrollierte, bewusste Prozess ist durch eine willentliche Steuerung der Handlung und eine aktive Selektion der Information in Bezug auf die Handlungsziele charakterisiert. Dies geht mit einer vergleichsweise hohen Anforderung an die Allokation der Aufmerksamkeit und an das Kurzzeitgedächtnis einher. Der kontrollierte oder bewusste Prozess gilt als begrenzt, sequentiell, langsam, aufwändig und lässt sich nur über einen relativ kurzen Zeitraum aufrechterhalten. Mit ihm bestimmen wir unsere Ziele, wählen die Mittel aus, mit denen wir die Ziele verfolgen, überwachen den Handlungsfortschritt, erkennen unsere Fehler und können diese wieder rückgängig machen [117]. Der automatische oder unbewusste Prozess ist der Zugriff auf bereits Gelerntes oder Erfahrenes. Der effiziente Umgang mit Verarbeitungsressourcen und ökonomisches Einsetzen der Aufmerksamkeitskapazität führen zu einem

¹⁶ ACC steht für **A**daptive **C**ruise **C**ontrol; auch unter dem Namen „Automatischer Abstandstempomat“ o.ä. bekanntes System, das analog zum Tempomat die vom Fahrer voreingestellte Geschwindigkeit hält, automatisch aber den Abstand zum Vorderfahrzeug auf der eigenen Fahrspur regelt.

natürlichen Trend, mehrfach ausgeführte Handlungen zu automatisieren, um diese Handlungen schließlich nicht mehr direkt, bewusst überwachen zu müssen. Der Zugriff ist durch Abruf von gespeicherten Schemata sehr schnell und erlaubt durch die minimale Beanspruchung der Aufmerksamkeit sowie des Kurzzeitgedächtnisses mit seiner kapazitiven Beschränkung zudem parallel ablaufende Handlungen.

Ein Modell, das die für die Informationsverarbeitung eines Menschen relevanten kognitiven Verhaltens- und Fertigkeitsebenen beschreibt, liefert RASMUSSEN [97]. Es ist in einschlägiger Literatur sehr gebräuchlich und hat weltweit die Denkweise vieler Wissenschaftler und Ingenieure beeinflusst. Bild 14 zeigt die Struktur des Modells nach RASMUSSEN.

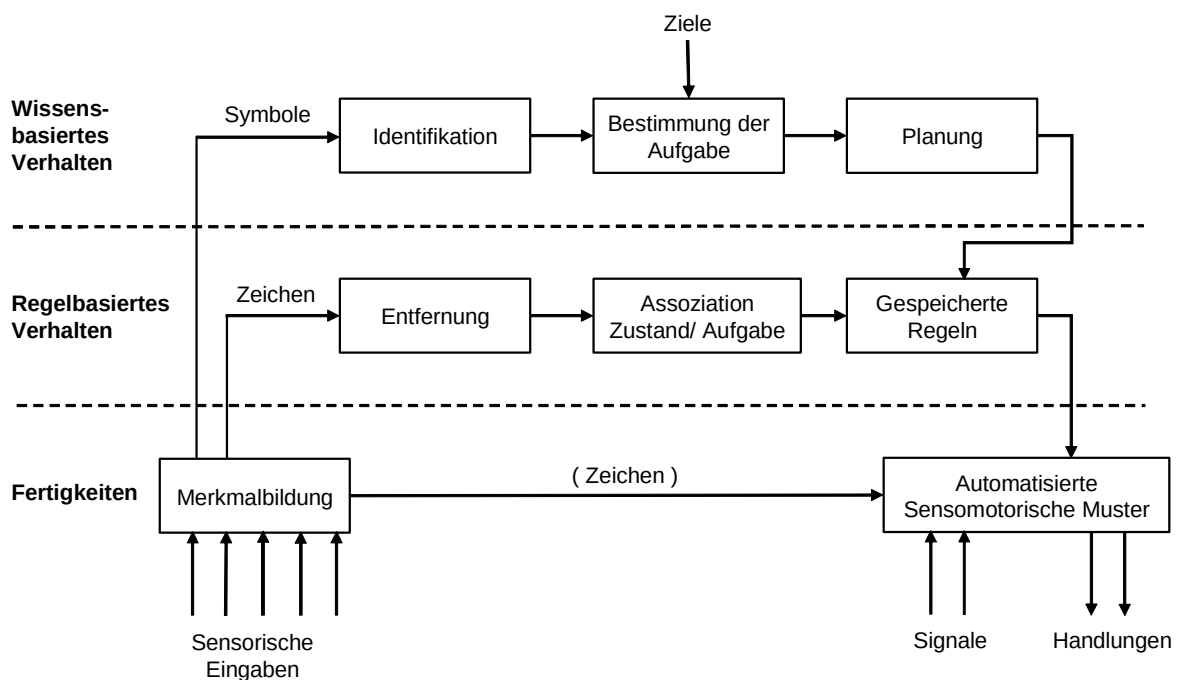


Bild 14: Ebenen menschlichen Verhaltens nach RASMUSSEN

Es unterteilt die zielgerichteten sensomotorischen Tätigkeiten des Menschen in drei Bereiche: in die Ebene des wissensbasierten Verhaltens („*knowledge-based-behavior*“), in die Ebene des regelbasierten Verhaltens („*rule-based behavior*“) und in die Ebene des fertigkeitsbasierten Verhaltens („*skill-based behavior*“). Auf der fertigkeitsbasierten Ebene laufen reflexartige Reiz-Reaktions-Mechanismen, die antrainiert wurden, selbstständig und ohne bewusste Kontrolle ab. Regelbasiertes Verhalten liegt in vertrauten Situationen vor, die durch gespeicherte Regeln behandelt werden können. Erkannte Zustände werden mit auszuführenden Aufgaben auf einfache Weise („WENN-DANN“) miteinander verknüpft. Die gespeicherten Regeln stehen auf dieser höheren Ebene bereit, um Unterprogramme z.B. Folgen von Handlungsabläufen auf der fertigkeitsbasierten Ebene zu koordinieren. Wissensbasiertes Verhalten auf der höchsten kognitiven Ebene wird erforderlich, wenn Situationen unbekannt und geeignete Regeln nicht vorhanden sind. Die vorliegende, unbekannte Situation wird nach den Prioritäten verschiedener Zielgrößen bewertet und dar-

aus eine Entscheidung bezüglich der zu bewältigenden Aufgabe abgeleitet. Dieser zielgesteuerte Vorgang führt zu Planungsaktivitäten, die auf die Auswahl zu modifizierender Alternativen oder auf deren Neuschöpfung für die Bildung von Regeln und die Auflösung von Handlungsfolgen gerichtet sind.

Die Einteilung in die drei Verhaltensebenen ist so grundlegend, dass grundsätzlich alle menschlichen Aktivitäten in diesem kognitiven Schema beschrieben werden können. Die Verbindung zu dem bereits vorgestellten Drei-Ebenen-Modell der Fahrzeugführung ist dadurch gegeben, dass die Unterteilung des menschlichen Verarbeitungsprozesses weitgehend mit den Tätigkeiten auf den drei Ebenen der Fahrzeugführung korrespondiert. Die Navigation (zumeist in unbekannter Umgebung) wird demnach mit wissensbasiertem Verhalten, die Bahnführung bzw. Lenkung mit regelbasiertem und die Stabilisierung mit fertigkeitbasiertem Verhalten gelöst. Mit wachsender Erfahrung aber verlagert sich die primäre Vorgehensweise von der wissensbasierten auf die regel- und fertigkeitbasierte. Das hat positive Auswirkungen auf die Reaktionszeit, da mit aufsteigender Ebene (z.B. vom fertigkeitbasierten zum regelbasierten Verhalten) der Zeitbedarf für eine Reaktion des Fahrers deutlich zunimmt. Das in der Regel plötzliche Auftreten kritischer Situationen lässt dem Fahrer also kaum die Möglichkeit, eine zeitaufwändige Entscheidung zu treffen, weshalb in Gefahrensituationen eine Handlungsauswahl primär über die Fertigkeitsebene vermutet werden darf [18]. Für ein Fahrerassistenzsystem zur Unterstützung auch in zeitkritischen Situationen bedeutet das, den Fahrer -wenn möglich- nicht auf die Ebene des wissensbasierten Verhaltens zu drängen, sondern mit ihm auf der regelbasierten Ebene oder besser auf der Ebene der Reiz-Reaktions-Mechanismen zu interagieren. Das Kapitel 4 der vorliegenden Arbeit beweist, dass dies im Rahmen der Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle des Querführungsassistenten mit der Wahl des geeigneten Signals möglich ist.

Die Aufgabe des Fahrzeugführens verlangt in den vorgestellten Ebenen vom Menschen permanente kognitive wie motorische Aktivitäten. Zum einen muss der Fahrer über die ihm zur Verfügung stehenden Sensoren die Informationen aufnehmen („*Wahrnehmen*“), die für den Ablauf des Verkehrs relevant sind. Diese Informationen gilt es anschließend zu verarbeiten. Neue und gespeicherte Informationen („*Erfahrungen*“) werden gegenübergestellt und eine Handlung abgeleitet („*Entscheiden*“). Abschließend führt der Fahrer die Operation aus („*Muskelaktivierung*“) [97] [24]. Der Prozess des Wahrnehmens dauert je nach Anforderungsgrad 100-300 ms, der Vorgang des Entscheidens z.B. beim Bremsen 150-300 ms, beim Lenken 300-400 ms. Die Zeit, die zur Muskelaktivierung benötigt wird, beträgt ca. 30 ms, die Umsetzung auf das Gas- oder Bremspedal weitere 25 ms [37]. Dabei ist zu beachten, dass je nach verwendetem Informationsübertragungskanal, Art der Informationsverarbeitung und Geisteszustand des Fahrers der zeitliche Durchlauf durch diese drei Bereiche stark unterschiedlich sein kann [8]. Im Vergleich mit der Leistungsfähigkeit technischer Systeme ist die menschliche Informationsverarbeitung damit relativ langsam, da elektrochemische Schaltvorgänge in ungefähr einer Millisekunde ausgeführt werden. Sie gewinnt aber durch eine hochparallele Verarbeitung an Leistungsfähigkeit. Sowohl der

Mensch als auch das technische System zeigen damit charakteristische Stärken, die es im Zuge des kooperativen Assistenzansatzes zusammenzuführen gilt.

2.3.4 Fehler und Absicht

Wenn der Mensch in komplexen Systemen agiert, unterlaufen ihm von Zeit zu Zeit Dinge, die im Widerspruch zu einer beabsichtigten oder erwarteten Handlung stehen. Auch ein zurückhaltender und vorsichtiger Fahrer wird gelegentlich Fehler machen. Der Mensch verfügt weder über die notwendigen Ressourcen, wie beispielsweise ein unbegrenztes Speichervermögen, einen beliebig schnellen Zugriff auf Wissen oder eine unbegrenzte Aufmerksamkeitskapazität, noch hat er das primäre Ziel, fehlerlos zu sein. Er nutzt vielmehr seine Fähigkeiten und Möglichkeiten optimal, um rationell und wirksam seine Ziele zu erreichen [117].

Der Mensch besitzt im Gegensatz zur Maschine die bemerkenswerte Fähigkeit, die Ähnlichkeiten und Regelmäßigkeiten, er in der Welt identifiziert, zu modellieren und neue Informationen auf Basis von im Gedächtnis vorhandenen Strukturen zu organisieren und sich dieser zu erinnern. Derartige Strukturen werden als *Schemata* bezeichnet. Die Schemata bilden diese gefundenen Ähnlichkeiten und Regelmäßigkeiten intern ab und können als Repräsentation von Erfahrung angesehen werden [98]. Ohne diese Mechanismen, die die komplexen Aufgaben der Informationsverarbeitung vereinfachen, wäre der Mensch aufgrund seiner ihm zur Verfügung stehenden begrenzten Ressourcen in vielen Fällen nicht in der Lage, komplexe oder neue Vorgänge zu bewältigen. Der Preis, den er für diesen sehr schnellen, stark automatisierten Zugriff auf Informationen zahlen muss, liegt in der Tendenz, bei der Wahrnehmung, Erkennung, Schlussfolgerung und bei Handlungen in Richtung des Bekannten und Erwarteten zu irren. Es besteht eine Neigung in der menschlichen Informationsverarbeitung, häufig erlebte oder leicht aktivierbare Ereignisse mit aktuellen Situationen zu verbinden und eingeübte Verhaltensweisen zu wiederholen. Dieser Effekt wird durch die ressourcenschonende Tendenz zu großzügiger Zuordnung der wahrgenommenen Situationen zu Musterklassen noch verstärkt.

Prinzipiell kann das menschliche Fehlverhalten auf jeder Verhaltensebene liegen. Die Definition nach REASON & MYCIELSKA nimmt eine Klassifikation in so genannte *Ausführungsfehler* („*slips*“), *Gedächtnisfehler* als unabsichtliche Nachlässigkeit („*laps*“) und *Denkfehler* als inkorrekte Absicht und Aktionen des Akteurs („*mistakes*“) vor [99]. Damit sind ‚slips‘ und ‚laps‘ Fehler in der Ausführung auf Fertigkeitsebene, während ‚mistakes‘ Fehler in der Generierung von Handlungszielen, Absichten und Aktionen auf höherer kognitiver Ebene sind. Die Ausführungsfehler sind gekennzeichnet durch Fehler bei der Ausführung stark automatisierter Aufgaben in einer bekannten Situation. Die Aufmerksamkeit wird, zumindest zum Teil, durch eine andere als die primär auszuführende Aufgabe beeinträchtigt. In diese Kategorie fallen Fehler, die als Flüchtigkeitsfehler und Ausrutscher bezeichnet werden können. Gedächtnisfehler treten bei falschem oder fehlendem Zugriff auf gespeicherte Informationen auf. In diese Fehlerkategorie fallen das Vergessen von Handlungsschritten

und das falsche Anknüpfen an Handlungsschritte, wenn Einzelheiten ausgelassen werden oder der Gedankenfaden verloren geht. Die Denk- und Planungsfehler schließlich sind gekennzeichnet durch die Inkonsistenz zwischen der ausgeführten Absicht (bewussten Handlung) und den beabsichtigten Konsequenzen. Aufgrund ihrer Natur sind sie weitaus schwieriger festzustellen als Ausführungsfehler. Unser Bewusstsein ist geschärft auf unbeabsichtigte Abweichungen von beabsichtigten Handlungen. Die Denk- und Planungsfehler dagegen können lange Zeit unerkannt bleiben [129].

Mit der Entwicklung des „Generic Error-Modeling Systems (GEMS)“ zeigt REASON, dass diese einfache Aufteilung in Denk- oder Planungsfehler und stereotypische Abweichungen von Handlungsplänen dem Phänomen Fehler nicht umfassend gerecht werden [98]. Das aus dieser Erkenntnis entwickelte Modell ist sehr stark von der vorstehend vorgestellten fertigungs-, regel- und wissensbasierten Verhaltensklassifikation von RASMUSSEN geprägt und propagiert konsequenterweise eine weitere Aufteilung der Denkfehler in regelbasierte und wissensbasierte Fehler. Damit lässt sich jeder Verhaltensebene im RASMUSSEN-Modell ein bestimmter Fehlertypus zuordnen. Eine Beschreibung der Fehlertypen zeigt Tabelle 3.

Tabelle 3: Fehlertypen des Generic Error-Modeling-Systems (GEMS)

Fehlertyp	Beschreibung
Denkfehler	Trotz Verfügbarkeit aller nötigen Informationen werden falsche oder unrealistische Ziele verfolgt, Teilziele falsch zusammengesetzt oder falsche Entscheidungen zwischen kontradiktorischen Teilzielen getroffen.
Merk- und Vergessensfehler	Pläne oder Teilziele werden nicht behalten; auf der intellektuellen Regulationsebene werden die Teile des Aktionsprogramms vergessen oder ausgelassen, die nicht bereits als fertiges Schema vorlagen, sondern speziell für ein bestimmtes Ziel konstruiert oder generiert werden müssen.
Urteilsfehler	Fehler, die bei der bewussten Wahrnehmung und Interpretation der Systemreaktion auftreten
Gewohnheitsfehler	Fehler, die beim Abruf konkreter, der Umgebungssituation angepasster Muster oder Schemata auftreten, wenn ein falsches Handlungsmuster aufgerufen wird
Unterlassensfehler	Fehler in Situationen, die eigentlich durch jederzeit verfügbare, gut eingeübte Handlungsschemata beherrscht werden. Diese gelangen dann nicht zur Ausführung, werden übersprungen oder zu spät aktiviert.
Erkennungsfehler	Rückmeldungen in Form von Signalen oder Merkmalen aus der Umwelt in gut beherrschten aber nicht automatisierten Handlungen werden übersehen oder verwechselt
Bewegungsfehler	Fehler bei weitgehend automatisierten, nicht bewusstseinspflichtigen Handlungen

Die Begriffe Absicht und Fehler sind untrennbar miteinander verknüpft. Jeder Versuch, menschliches Fehlverhalten zu definieren und ggf. zu klassifizieren, muss sich mit der Vielfältigkeit des Ursprungs menschlichen Handelns - der Absicht, mit der er handelt – beschäftigen. Dabei wird sprachlich kaum getrennt zwischen dem, was der Mensch als Intension im Sinne eines Ziels tatsächlich verfolgt und den eigentlichen Zielen, die sich auf-

grund einer Situationsanalyse und –Bewertung nach objektiven Kriterien ergeben würden. Selbst bei Übereinstimmung von Absichten und Handlung des Akteurs kann die Handlung den objektiv richtigen Erwartungen bezüglich der „richtigen Handlung“ widersprechen. Ein Teil der Fehler wird mit „Absicht“ begangen, weil man annimmt, das Ergebnis der Überlegung sei richtig, obwohl man sich im Irrtum befindet.

Die Absichtserkennung wird damit zu einem Schlüsselement kooperativer Assistenzsysteme. Eine ideale Unterstützung würde ein vollständiges Verständnis des Wählens und Wollens des Fahrers voraussetzen. Von vielen Wissenschaftlern wird aber bezweifelt, dass intensionale Zustände wie Überzeugung, Hoffnung, Befürchtung usw. in der Phase der weitgesteckten Zielrepräsentation als Grundlage für kausale Verhaltensklärung dienen können. Zumindest sind diese Zustände weder messbar, erfassbar, noch etwaige Modelle nachprüfbar. Die Bezeichnung Absicht bestimmt in diesem Verständnis einen mentalen Zustand, der sich einer direkten Beobachtung entzieht. Auf die Absicht des Menschen bei seiner Interaktion mit dem technischen System kann nur durch Handlungsbeobachtung indirekt geschlossen werden, wenn er diese nicht sprachlich preisgibt. Die Absichtserkennung kann sich grundsätzlich auf zwei Wissensquellen stützen: zum einen auf die Merkmale der umgebenden Umwelt, die der Akteur als Reiz wahrnimmt und die ihn zum Handeln veranlassen, und zum anderen auf das Verhalten des Handelnden selbst, als Reaktion auf die aktuelle Situation. Der Prozess der Absichtserkennung schließt aus Merkmalen auf eine mit dem Verhalten und der Situation konsistente Absicht.

2.3.5 Querführungsverhalten

Diese Arbeit legt, wie bereits angeführt, ein Augenmerk auf die Unterstützung des Fahrers in der Querführung. Deshalb darf an dieser Stelle eine Betrachtung des menschlichen Querführungsverhaltens und der Möglichkeiten der mathematischen Beschreibung desselben nicht fehlen.

2.3.5.1 Beschreibung des menschlichen Querführungsverhaltens

Die Art, wie ein Fahrzeug in der Spur gehalten wird, unterscheidet sich nicht nur von Fahrer zu Fahrer sehr stark, sondern überdies auch bei ein und demselben Fahrer beispielsweise in Abhängigkeit der Gemütslage. Fahrerverhaltensuntersuchungen ergeben für die gleiche Verkehrssituation immer wieder große Unterschiede in der Erledigung der Fahraufgabe [60]. Diese Effekte werden als interindividuelle (zwischen verschiedenen Personen) bzw. *intraindividuelle* (innerhalb einer Person) *Unterschiede* im Fahrverhalten bezeichnet. Ein allgemeingültiges Fahrernormalverhalten herauszuarbeiten, war und ist Thema einer Vielzahl von Forschungsarbeiten, erweist sich jedoch aufgrund der großen Bandbreite der Unterschiede sowie der schlechten Prädiktionsmöglichkeit des menschlichen Verhaltens als äußerst schwierig.

Einige charakteristische Parameter, in denen sich derartige Unterschiede im Querführungsverhalten widerspiegeln, sind unter anderem die vom Fahrer tolerierten Querabweichungswerte¹⁷, die mittlere Querablage als eine Art Offset-Fehler, die tolerierten Gierwinkel¹⁸ bzw. Gierraten¹⁹ sowie die maximale Querbeschleunigung²⁰, die nach Meinung und Können des Fahrers auf das Fahrzeug wirken darf. So wird ein sportlicher Fahrer vermutlich einen breiteren Korridor innerhalb der Fahrspur befahren (z.B. Kurvenschneiden) als ein Fahrer mit defensivem, sicherheitsbetontem Fahrverhalten. Daneben existieren Unterschiede im Querführungsverhalten, die aus der persönlichen Erfahrung eines Fahrers resultieren. JÜRGENSOHN zufolge setzt sich die Lenkaufgabe eines Fahrzeugs aus gesteuerten, so genannten ballistischen und geregelten bzw. linearen Bewegungen zusammen [55]. Je geübter ein Fahrer ist, desto besser kann er das Verhalten seines Fahrzeugs einschätzen und damit die Fahrzeugbewegung weitsichtiger regeln. Bei sehr erfahrenen Lenkern zieht das Fahrzeug demnach eine gleichförmige, lineare Bahn in der Fahrspur. Im Gegensatz dazu wird ein ungeübter Fahrer versuchen, die Abweichungen von der Sollspur mit stoßhaften, ballistischen Lenkbewegungen zu korrigieren. Ein unruhigerer, nichtlinearer, fast sprunghafter Spurverlauf ist die Folge (siehe Bild 15).

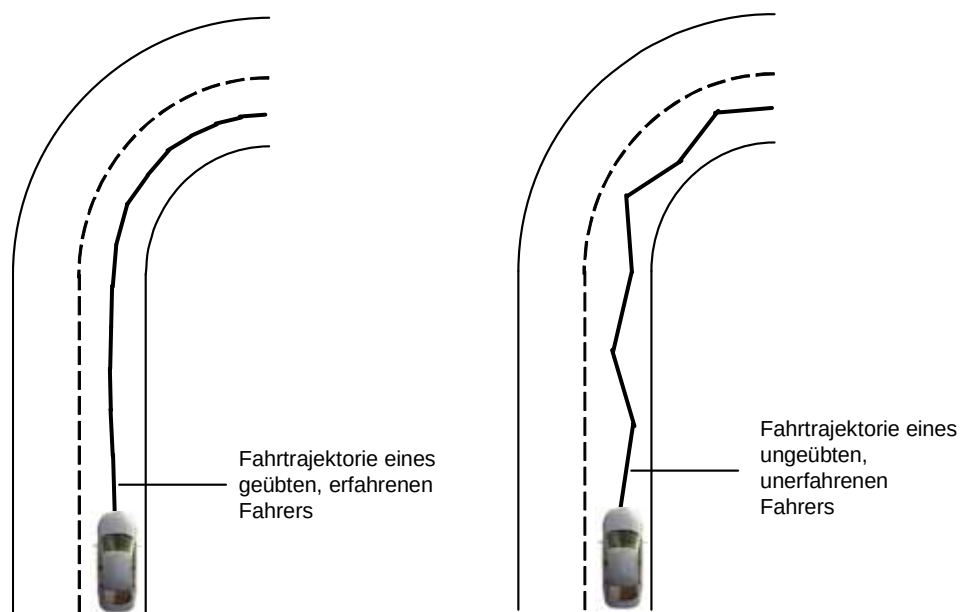


Bild 15: Unterschiedliche Fahrtrajektorie zwischen einem geübten und einem ungeübten Fahrer

Die Typologie von Spurwechselvorgängen ist mittlerweile umfassend untersucht. FASTENMEIER ET AL. analysiert die Spurwechselvorgänge im Verkehr und stellt sich zu-

¹⁷ Querabweichung ist die Lage des Fahrzeugs in der Fahrspur ausgehend von der Spurmitte; im Folgenden auch „Ablage“ genannt

¹⁸ Gierwinkel oder Gierwinkelfehler ist der Winkel um die Hochachse zwischen dem Richtungsvektor des Fahrbahnverlaufs und dem Bewegungsvektor des Fahrzeugs.

¹⁹ Gierrate ist die Ableitung des Gierwinkels und beschreibt damit die Geschwindigkeit, mit der sich der Gierwinkel ändert.

nächst die Frage, wie dieser Vorgang als solcher zu erkennen ist [32]. Ein Spurwechsel lässt sich seinen Überlegungen nach in folgende, von außen sichtbare Phasen unterteilen: erstens der Überschreitung der Fahrspurmarkierungen, zweitens der Blockierung der Start- und Zielspur und drittens der Positionierung des Fahrzeugs mit allen vier Rädern auf dem neuen Fahrstreifen. Liegen nicht alle Merkmale bei einem Fahrmanöver vor, so gilt der Spurwechsel als nicht vollständig durchgeführt oder als abgebrochen. Das Verhalten des Fahrers beim Spurwechselvorgang teilt FASTENMEIER in vier Abschnitte auf. Im Entscheidungsprozess erkennt der Fahrer die navigatorischen Erfordernisse. Er prüft die Legalität (z.B. Überholverbot) und die Durchführbarkeit seines Vorhabens. Auf Autobahnen ist ein Spurwechselvorgang dann nicht durchführbar, wenn beispielsweise ein Fremdfahrzeug die Zielspur, also die neue Wunschspur belegt. Auf Land- oder Bundesstraßen verhindert beispielsweise die schlechte Einsehbarkeit des weiteren Straßenverlaufs oder Gegenverkehr einen Spurwechsel. Hat der Fahrer sich für einen Spurwechsel entschieden, so geht er anschließend in die Vorbereitungsphase über. Er signalisiert (im optimalen Fall) seinen Wunsch durch Betätigung des Blinkers und passt durch Beschleunigung oder Verzögerungsmanöver die Geschwindigkeit seines Fahrzeugs seinem Spurwechselwunsch bzw. dem Verkehr auf der Zielspur an. Im nächsten Schritt wird nach einer nochmaligen Überprüfung der Situation mit der Durchführung begonnen. Über eine bewusste Lenkbewegung wird die Querablage stetig vergrößert und die Spurbegrenzung überfahren. Je nach Situation erfolgt eine erneute Korrektur der Geschwindigkeit. Den Abschluss eines Spurwechsels bildet die Positionierung des Fahrzeugs auf der Zielspurmitte. Die Signalgebung über den Blinker wird beendet. In den einzelnen Phasen treten bei jedem Spurwechsel unterschiedliche Verkehrs- und Fahrzeugsituationen auf.

SPARMANN betrachtete in seiner Arbeit freiwillige Spurwechselvorgänge auf zweispurigen Autobahn-Richtungsfahrbahnen. Er berücksichtigte dabei durch die Analyse des einzelnen Spurwechselvorgangs einerseits mikroskopische Aspekte, sowie durch die Betrachtung der Häufigkeit des Spurwechselvorgangs und die Abhängigkeit dieser Größe von der Verkehrsstärke andererseits auch makroskopische Aspekte [115]. Er konnte dabei im Rahmen verschiedener Versuchsfahrten feststellen, dass beim Spurwechsel nach links das Manöver in einem äußerst geringen Abstand zum Fahrzeug auf der Zielspur eingeleitet wird, selbst wenn dieses deutlich schneller fährt. Behinderungen der auf der Zielspur fahrenden Fahrzeuge werden in Kauf genommen. Er konstatiert zudem ein erhebliches Gefahrenpotential, da die Fahrzeugführer seinen Beobachtungen nach beim Spurwechsel oft überfordert sind, da sie gleichzeitig nach vorn, hinten und zur Seite Beobachtungen und Schätzungen von Geschwindigkeiten und Abständen vornehmen müssen. Die Ergebnisse legen den Schluss nahe, dass nicht die fahrdynamische Komponente den Spurwechsel erschwert, sondern dass die dabei notwendigen kognitiven Aufgaben den Fahrer belasten und das zu Fehlern führen kann.

²⁰ Querbeschleunigung ist die Beschleunigung, die quer zur Fahrzeuglängsachse wirkt.

SALVUCCI, LIU & BOER erarbeiteten im Rahmen eines Simulatorexperiments eine durchschnittliche Spurwechseldauer von 5,1 Sekunden [103]. In einem späteren Experiment fanden SALVUCCI & LIU heraus, dass die Zeit von Beginn des Spurwechsels bis zum Überfahren der Spurbegrenzungslinie bei durchschnittlich drei Sekunden liegt (siehe Tabelle 4) [104].

Tabelle 4: Durchschnittswerte für charakteristische Zeiten beim Spurwechsel

Quelle	Gesamte Spurwechseldauer	Zeit zwischen Spurwechselbeginn und Überfahren der Fahrbahnmarkierung
Salvucci, Liu & Boer 2001	$\bar{\sigma} = 5,1 \text{ s}$	-
Salvucci, & Liu 2002	-	$\bar{\sigma} = 3,0 \text{ s}$
Olsen et al. 2002	$\bar{\sigma} = 6,3 \text{ s}$	-
Praxenthaler 2003	-	$\bar{\sigma} = 2,0 \text{ s}$ (1,0 s im kürzesten Fall)

OLSEN ET AL. untersuchten 8.667 Spurwechsel von 16 Versuchspersonen im Straßenverkehr [78]. Die unabhängigen Variablen in diesem Versuch waren Geschlecht, Fahrertyp (Limousinenfahrer vs. SUV²¹-Fahrer), Strecke (Bundesstraße vs. Autobahn) und Fahrzeugtyp des Versuchsfahrzeugs (Limousine vs. SUV). Gemessen wurde neben der Dauer auch der Manövertyp (z.B. langsames Führungsfahrzeug, Spurwechsel nach links, Überholen). Die Dauer des Spurwechsels lag bei durchschnittlich 6,3 Sekunden ($s^{22} = 2,0$ Sekunden). Es zeigte sich, dass keine der unabhängigen Variablen einen signifikanten Einfluss auf die Dauer des Spurwechsels hatte. PRAXENTHALER ließ seine Versuchspersonen in einem Simulatorversuch eine Strecke jeweils einmal mit ablenkender Zusatzaufgabe fahren und einmal ohne [94]. Bezüglich der Typologie der Spurwechsel konnte er keinen Unterschied feststellen. Die durchschnittliche Zeit vom Beginn eines Spurwechsels bis zum Überfahren der Spurbegrenzungen lag hier bei 2 Sekunden. Im kürzesten Fall betrug diese Zeit 1 Sekunde.

Die mathematische Beschreibung des Spurwechsel- oder Ausweichvorgangs wurde in der Arbeit von WEISS untersucht. Als völlig ungeeignet erweist sich das Kreisbogenverfahren, bei dem die Spurwechseltrajektorie durch das Aneinanderhängen von zwei gegenläufig gekrümmten Kreisbögen rekonstruiert wird [126]. Bessere Ergebnisse liefert eine mathematische Beschreibung auf Basis einer „schrägen Sinuslinie“. Zu deren Bildung wird eine

²¹ SUV steht für **S**port **U**tility **V**ehicle; Fahrzeugklasse, der Fahrzeuge wie der AUDI Q7, BMW X5 und Mercedes M-Klasse angehören; ähnlich zu Geländewagen

²² s steht für Standardabweichung; die Standardabweichung ist ein Maß für die Streuung der Werte einer Zufallsgröße

Rampenfunktion mit einer Sinusfunktion überlagert. Aus diesem Ansatz heraus entwickelt er ein verbessertes Rekonstruktionsverfahren. Im Rahmen der durchgeführten Fahrversuche kann WEISS zudem nachweisen, dass das Fahrverhalten nicht vom jeweiligen Fahrzeug abhängt, da die einzelnen Fahrer mit unterschiedlichen Fahrzeugen annähernd gleiche Querbeschleunigungswerte erzielen.

Die charakteristischen Größen des Spurhaltevorgangs wurden ebenfalls thematisiert. SATO ET AL. untersuchten, welche laterale Position Fahrer auf japanischen Schnellstraßen einnehmen, um daraus eine Schwelle für einen „Time to Departure“²³-Ansatz vorzuschlagen. Die dynamische, laterale Position zwischen den Spurmarkierungen und dem Fahrzeug gilt als eine wichtige Variable zum Design und zur Standardisierung eines Spurverlassenswarners. Im Rahmen von Realfahrten mit 10 männlichen Versuchspersonen in Tokio und Umgebung konnte die Verteilung und die Varianz der dynamischen, lateralen Position analysiert werden. Die Spurweite betrug zwischen 3,25 und 3,75 Meter. Die Autoren arbeiteten dabei mit zwei CCD-Kameras, deren Bilder nachträglich mit einer Genauigkeit von 0,04 Meter ausgewertet wurden. Bei den meisten Testpersonen ergaben die Ablagewerte eine Gaußsche Normalverteilung. Die durchschnittlichen Werte der meisten Fahrer bewegen sich in einem Bereich zwischen -0,2 m und +0,2 m zur Spurmitte. Die Autoren mutmaßen zudem nach Analyse ihrer Daten, dass die Spurtreue mit der Geschwindigkeit abnimmt [105].

HACKENBERG & HEIBING gewannen in ihrer Arbeit Erkenntnisse zum Zusammenwirken zwischen Längs- und Querregelungstätigkeit des Fahrers auf rein experimenteller Grundlage [44]. Sie zeigen anhand der Auswertung von Fahrten auf kurvigen und verkehrsarmen Landstraßen, dass sich mit steigender Geschwindigkeit die Querbeschleunigungen nach einer hyperbolischen Funktion verringern, um bei 90 km/h nur noch ca. $0,5 \text{ m/s}^2$ zu betragen. Bei großem Lenkradeinschlag wird nur eine geringe Längsbeschleunigung eingestellt. In normalen Fahrsituationen nützen durchschnittliche Fahrer nur einen Bruchteil der fahrdynamischen Leistungsfähigkeit der Fahrzeuge in Querrichtung aus, ein großer Sicherheitsfaktor bleibt bestehen.

KOPF führt eine Arbeit von BREITUNG & HABEKOST an, in der diese untersuchten, ob das Vorhandensein eines Vorderfahrzeugs Einfluss auf das Querführungsverhalten hat [60]. Die Untersuchung zeigt, dass bei allen untersuchten Geschwindigkeiten in Geraden und Linkskurven kein Einfluss zu erkennen ist. Nur in Rechtskurven zeigten die mittleren „Time to Line Crossing (TLC)“²⁴-Werte bei allen Geschwindigkeiten in Situationen, in denen ein Vorderfahrzeug vorhanden war, eine auf dem 0,1% Niveau signifikante Verschiebung zu höheren Werten. Die Art des Vorderfahrzeugs hat auf diesen Effekt keinen Einfluss. KOPF mutmaßt auf Basis einer in seiner Arbeit angefügten Studie, dass das Querführungsverhalten abhängig von seitlich fahrenden Fahrzeugen ist. Auch die aktuelle Spurwahl hat

²³ Time to Departure bezieht sich auf jene Zeit, bis ein Fahrzeug von seiner augenblicklichen lateralen Position in der Spur die Fahrspur verlässt, d.h. mit den Rädern die Spurmarkierung übertritt

²⁴ Erklärung der Time to Line Crossing (TLC) siehe Kapitel 6.2.2.1

seiner Meinung nach einen Einfluss [60]. Aus GODTHELP ist der Einfluss der Geschwindigkeit auf die TLC-Werte (Median und 15%-Wert) bekannt [40].

2.3.5.2 Modellierung des menschlichen Querführungsverhaltens

Mit der Modellierung des Fahrers beschäftigt sich die wissenschaftliche Forschung schon seit einigen Jahrzehnten. Um das Fahrverhalten angemessen beschreiben zu können, müssen sowohl die Teilsysteme als auch die Interaktion zwischen ihnen modelliert werden. Die Handlungen und Fehler sind nur aus der Interaktion des Fahrers mit der Umwelt zu verstehen [51]. Ein weiteres Kriterium für die Modellgüte ist die Adaptivität, das heißt die Fähigkeit des Modells, sich an zeitlich veränderliche bzw. individualspezifische Eigenschaften der zu beschreibenden Systemkomponente anzupassen. Im Hinblick auf den Fahrer heißt das vor allem, den Unterschied zwischen den verschiedenen Fahrern und den damit unterschiedlichen Fahrstilen zu erfassen [60].

Die Entwicklung von Fahrermodellen erfolgte und erfolgt nach WILLUMEIT & JÜRGENSOHN für den Einsatz in verschiedenen Gebieten (siehe Bild 16) [128].

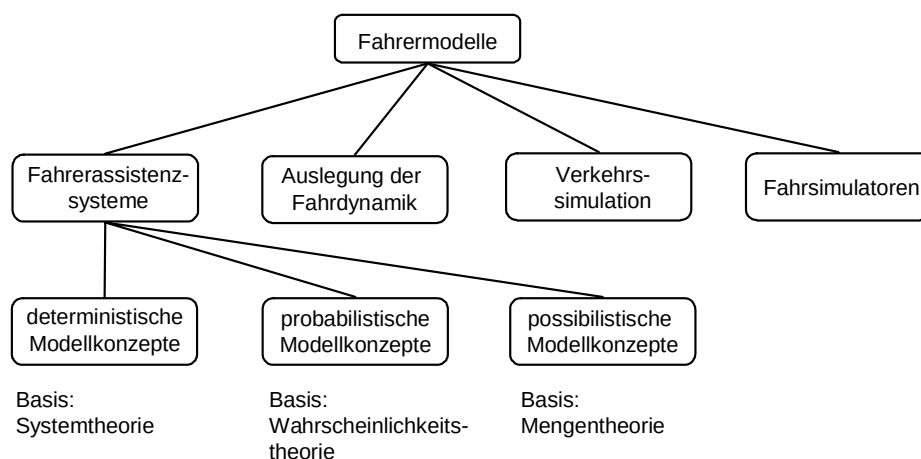


Bild 16: Einteilung der Fahrermodelle

Eine erste Gruppe dient der der Auslegung der Fahrdynamik, insbesondere in der Entwicklung von Fahrwerkskomponenten. Deren Verwendung hat zum Ziel, die Wirkungen konstruktiver Veränderungen am Fahrzeug auf das Gesamtsystem aus Fahrer und Fahrzeug vorhersagen zu können. Obwohl aber mit Hilfe der entwickelten Fahrermodelle durchaus qualitative Aussagen über das Gesamtsystem möglich sind, spielen Fahrermodelle -im Gegensatz zu Fahrzeugmodellen- im Entwicklungsprozess des Automobils bis heute keine große Rolle.

Auch zur Verkehrssimulation werden Fahrermodelle eingesetzt. In Verkehrsflussmodellen soll das Verhalten von Fahrzeugkolonnen oder Fahrzeugansammlungen durch die Simulation einzelner Fahrzeuge nachgebildet werden. Einen praktischen Nutzen zeigen diese bei der Vorhersage von Wirkungen bestimmter Eingriffe auf den Verkehrsfluss - beispielsweise

se auch durch Fahrerassistenzsysteme. Die Modellparameter können allerdings nur durch Messungen im realen Verkehr ermittelt werden. Damit wird im Grunde kein individueller Fahrer, sondern ein mittleres Fahrverhalten nachgebildet.

Fahrsimulatoren leisten einen wichtigen Beitrag zur Erforschung des Fahrerverhaltens. Mittlerweile sind sie auch aus der Ausbildung von Fahrern beispielsweise von Gefahrguttransportern oder bei Polizeieinsätzen nicht mehr wegzudenken. Zur Verwendung in Fahrsimulatoren sind Fahrermodelle notwendig, die andere, modellierte Verkehrsteilnehmer so steuern, dass sie in den Augen des menschlichen Probanden ein realistisches Verhalten zeigen. EHMANNs untersucht beispielsweise in seiner Arbeit das taktische Spurwechselverhalten, um die Modellierung desselben in die Verkehrsflusssimulation PELOPS²⁵ des Instituts für Kraftfahrwesen Aachen einfließen lassen zu können. Durch die Analyse der Verhaltensmuster sowie der Zielgrößen der Fahrer beim Spurwechsel ist ihm die Umsetzung des Spurwechselmanövers in einem Modell möglich. Dabei hat sich herausgestellt, dass das Verhalten der Fahrer beim Spurwechsel durch den Beschleunigungsverlauf und die Grenzwerte von Zeitlücken und Kollisionszeit beschreibbar ist. Er widmet sich besonders der taktischen Komponente des Spurwechselvorgangs. Das aktive Ansteuern von Lücken und die Aufweitung der vorhandenen Lücken beispielsweise durch Blinkerbetätigung oder das kooperative Verhalten der anderen Verkehrsteilnehmer, sind seinen Fahrversuchen entsprechend besonders im dichten Verkehr zu beobachten [27].

Besonders die Anwendung von Fahrermodellen innerhalb der Fahrerassistenzsysteme findet eine zunehmend große Bedeutung. Wegen der großen Variation menschlichen Fahrerverhaltens ist es nur mit Hilfe eines adaptiven Fahrermodells möglich, den Fahrer zielgerichtet zu unterstützen, ohne ihn zu bevormunden und ohne dass das System Aktionen ausführt, die gegen die Intentionen des Fahrers gerichtet sind. Das trifft in besonderem Maße für die warnenden Systeme zu, für die eine Reihe sehr umfangreicher Fahrermodelle entwickelt wurden. Seit Mitte der fünfziger Jahre wurde vor allem in den USA und Japan vermehrt Forschung auf dem Gebiet von Fahrermodellen betrieben, die zum Ziel hatten, das Fahrernormalverhalten mathematisch oder systemtheoretisch nachbilden zu können. Eine Analyse der bis heute bekannten Fahrermodelle für die Querführung liefert eine große Anzahl von Modellen, die sich oft nur wenig unterscheiden. APEL unterteilt sämtliche bis dato bestehenden Fahrermodelle in drei Klassen. Zum einen sind dies die Modelle auf Basis der Systemtheorie, welche er als „deterministische Modellkonzepte“ bezeichnet. Des Weiteren existieren Modelle, deren mathematische Basis auf der Wahrscheinlichkeitstheorie fußt. Diese werden auch als „probabilistische Modellkonzepte“ bezeichnet. Die dritte Klasse bilden Modelle, welche die unscharfe Mengentheorie zu Grunde legen. Diese werden „possibilistische Modellkonzepte“ genannt. MOURANT & AL-SHIHABI stellen eine alternative Kategorisierung der bestehenden Modelle vor. Sie orientieren sich dabei an den zugrunde liegenden verhaltenspsychologischen Ansätzen. Ihnen zufolge gehen alle Mo-

²⁵ PELOPS steht für **P**rogrammsystem zur **E**ntwicklung **L**ängsdynamischer mikr**O**skopischer Verkehrs**P**rozesse in **S**ystemrelevanter Umgebung

delle der frühen Fahrermodellforschung von fähigkeitsbasierten Ansätzen aus, während ab etwa 1960 zunehmend auch motivationsbasierte Ansätze folgten [73].

Deterministische Modellkonzepte

Die *deterministischen* oder *systemtheoretischen Modelle* verfolgen den Ansatz, dass der zeitliche Verlauf der Eingangsgrößen eindeutig dem zeitlichen Verlauf der Ausgangsgrößen zugeordnet werden kann. Das Verhalten des Fahrers wird beschrieben durch lineare Differentialgleichungen mit Zeitverschiebungsoperatoren und eventuell nichtlinearen Anteilen. In den meisten Modellen zur Querführung ist der Fahrerausgang der Lenkwinkel. Bis heute sind diese Modelle am verbreitetsten [128]. Sie sind in den Augen von APEL am besten zur Führung eines Fahrzeugs geeignet, da sie durch die gewöhnliche Regelungstechnik beschreib- und kontrollierbar sind [4]. Die Ursprünge der Fahrermodelle zur Beschreibung der Lenkaktivität liegen in Japan. In einer der ersten Arbeiten zur Querführung ging KONDO davon aus, dass der Fahrer immer in der Art lenkt, dass ein imaginärer Punkt in einer bestimmten Vorausschauentfernung möglichst immer mit dem Sichtpunkt auf der Sollfahrlinie zusammenfällt. Der Fahrer versucht somit also, die Querabweichung in der Vorausschauentfernung zu minimieren [59]. KONDO stellte zudem ein zweites Modell auf Basis der Zustandsregler vor. Er nimmt an, dass der Lenkwinkel sich aus einer Linearkombination der Zustandgrößen Gierwinkelfehler, Kurswinkel und Querabweichung im Schwerpunkt ergibt. Beide Modellansätze wurden in zahlreichen Folgearbeiten wieder aufgegriffen.

Eines der bekanntesten Fahrermodelle stellte MCRUER mit dem so genannten „Cross-Over-Modell“ vor [69]. Es gilt als die Grundform des parametrischen, quasilinearen Modells des Menschen als Regler für die Querdynamik. In einer Vielzahl von Versuchen mit dem Menschen als Regler eines Flugzeugs stellte er fest, dass durch die Adaption des Menschen an seine Regelaufgabe der Gesamtregelkreis auch bei verschiedenen Situationen immer eine ähnliche Struktur beibehält. Die Schnittfrequenz („cross-over-frequency“) ist definiert als die Frequenz, bei welcher der Amplitudengang des offenen Regelkreises den Wert 1 aufweist. MCRUER fand heraus, dass sich bei ähnlichen Regelaufgaben weder diese Frequenz, noch das Verhalten im Bereich von einer Dekade um diese Frequenz wesentlich ändern. Der Regelkreis arbeitet in diesem Bereich wie ein Integrator. Der Amplitudengang weist eine Steigung von -20dB pro Dekade auf, während die Phase im Bereich zwischen -90° und -180° liegt. Demnach ließe sich jeder Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis sehr bequem allein durch die Angabe der charakteristischen Schnittfrequenz beschreiben. Seine Ergebnisse zeigen auch, dass der Mensch als Regler bei hohen Frequenzen zu Instabilität neigt, ansonsten jedoch recht linear arbeitet. Eine der Besonderheiten des Modells ist der Verzicht darauf, den Menschen als separierbares System zu beschreiben, sondern Mensch und Maschine als Einheit zu betrachten. Es drückt allein die symbiotischen Eigenschaften des Gesamtsystems in regelungstechnischen Termen aus [55].

Eine weitere wichtige Klasse bilden die Modelle mit antizipatorischen Steueranteilen. Diese Modellvariante geht davon aus, dass sich ein Teil des Lenkwinkels aus der Krümmung der Straße in einer bestimmten Entfernung voraus ergibt. Diesen Modellansatz verfolgte 1977 beispielsweise DONGES mit seinem 2-Level-Modell des menschlichen Fahrverhaltens [26]. Demnach lässt sich die Fahraufgabe in zwei Bereiche zerlegen, einen leitenden, wegweisenden sowie einen stabilisierenden Teil.

Probabilistische Modellkonzepte

Die *probabilistischen Modelle* verfügen im Allgemeinen über einen Katalog an Beispielsituationen, ein „Gedächtnis“ aus empirischen Daten, dessen Inhalt mit der gerade vorliegenden Situation verglichen wird. Das am ehesten passende Beispiel kommt zur Anwendung und die mit ihm hinterlegte Handlungsroutine wird eingeleitet. Eine weitere Modellart, die APEL ebenso zu den probabilistischen Modellen zählt, sind Modelle, die auf der optimalen Reglertheorie basieren. Bei diesen wird aus den geschätzten Zuständen ein Gütefunktional abgeleitet, welches es zu minimieren gilt. In ihren Untersuchungen versuchten PENTLAND & LIU, das menschliche Fahrverhalten auf regelbasierter Ebene nachzubilden [93]. Dazu erstellten sie so genannte dynamische Markov-Modelle, die sie auf verschiedene Testfahrer parametrisierten, um parallel zu den durchgeführten Testfahrten die Reaktionen der Fahrer zu prognostizieren. Kernpunkt ihres Modells ist die Schätzung eines internen Zustandes, in dem sich der Fahrer befindet. Dieser Zustand kann nun in einem oder mehreren Handlungsschemata vorkommen, welche die gängigsten Fahrmanöver beschreiben. So ist beispielsweise die Aktion „Kurvenfahrt“ aufgebaut aus einer Kette von Einzelzuständen, etwa der Einfahrt in die Kurve, dem Halten des Fahrzeugs in der Kurve und dem Übergang zur Geradeausfahrt. Derartige Handlungsketten sind natürlich beliebig erweiter- und detaillierbar, gemein ist ihnen jedoch, dass sich der Übergang von einem zum nächsten Zustand durch eine statistische Transitionswahrscheinlichkeit beschreiben lässt. Daraus kann das Modell den Folgezustand mit der höchsten Wahrscheinlichkeit ableiten und damit das Verhalten des Fahrers prognostizieren. Abweichungen zwischen geschätzter und tatsächlicher Aktion werden über ein Kalman-Filter zurückgeführt und dienen als Eingang für die Prädiktion. Im Versuch mit dem Fahrsimulator erreichten PENTLAND & LIU auf diese Weise zwar eine mittlere Erkennungswahrscheinlichkeit von 95,24% zwischen prognostiziertem Verhalten des Modells und tatsächlichem Verhalten des Fahrers. Allerdings gestanden die beiden Autoren bereits bei der Veröffentlichung ihrer Ergebnisse ein, dass trotz der hohen Übereinstimmung der Transfer auf andere menschliche Handlungen oder auf den realen Fahrbetrieb nicht uneingeschränkt möglich ist. Als Schwierigkeiten identifizieren sie Fahrstile, die in ihrem Kader von Versuchspersonen nicht vertreten waren, sowie Fahrsituationen, welche von dem ihnen zu Verfügung stehenden Fahrsimulator nicht abgedeckt wurden.

Possibilistische Modellkonzepte

Als *possibilistische Modelle* gelten diejenigen, die Expertenwissen über die Aufgabe einbeziehen und daraus mit Hilfe der unscharfen Mathematik Stellgrößen ableiten. Eine Art generellen Bauplan eines Fahrermodells für den Einsatz in Fahrsimulatoren auf Basis der Fuzzy-Mengentheorie stellen MOURANT & AL-SHIHABI vor [73]. Da den Fahrern die Daten zur Beschreibung ihres Fahrzeugs und des Umfelds im Allgemeinen nicht in präziser, numerischer Form vorliegen, eignet sich ihrer Meinung nach gerade die Theorie der unscharfen Mengen, um das menschliche Fahrverhalten nachzubilden. Sie sind der Meinung, dass es bei der Simulation menschlichen Fahrverhaltens nicht darum geht, das Verhalten erklären zu können, sondern vielmehr darum, es approximieren zu können. Die Möglichkeit, einer einzigen Variablen gleichzeitig mehrere Werte mit unterschiedlichen Wahrheitsgraden zuweisen zu können, begründet in ihren Augen den Vorteil der Fuzzylogic in dieser Disziplin. Das von ihnen vorgeschlagene Modellkonzept teilt das Rahmenwerk „menschliches Fahrverhalten“ in vier Bereiche auf: eine Einheit zur Umfeldwahrnehmung („perception“), eine Einheit zur Emotionsverarbeitung („emotions unit“), eine Einheit zum Fällen von Entscheidungen („decision making unit“), sowie eine Einheit zum Umsetzen dieser Entscheidungen („decision implementation unit“). Alle vier Einheiten agieren untereinander und mit der vom Fahrsimulator bereitgestellten, virtuellen Umgebung, MOURANT & AL-SHIHABI bezeichnen ihr Konzept als Rahmenwerk, da das eigentliche Füllen der Blöcke dem Anwender überlassen bleibt, der aus dem Konzept ein funktionierendes Modell ableiten will. Dazu müssen die einzelnen Blöcke mit einem Satz an Fuzzyvariablen und –regeln ausgestattet werden. Vor allem die Parametrierung der Zugehörigkeitsfunktionen ist von entscheidender Bedeutung für die Art von Fahrverhalten, die letztendlich approximiert wird. So mag einem defensiven Fahrer der Abstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeug viel zu gering vorkommen, während ein aggressiver Fahrer diesen als gerade geeignet empfindet. Wie bei den vorstehend vorgestellten Modellansätzen auch, stellt die Parametrierung des Modells das eigentliche Problem dar.

In ihrer Arbeit gehen WILLUMEIT & JÜRGENSOHN sehr kritisch auf die genannten Fahrermodelle ein [128]. Sie stellen eingangs als eines der großen Probleme bei der Nachbildung menschlichen Verhaltens fest, dass dieses eine große Variabilität, Flexibilität und große interindividuelle Unterschiede aufweist. Der Unterschied von Mensch und technischem Regler liegt vor allem darin, dass menschliches Verhalten zum großen Teil zielgerichtet ist und nicht eine reine Reaktion auf einen momentanen Reiz darstellt. Damit unterscheidet sich ein Ziel von einer Führungsgröße dadurch, dass es nicht unbedingt eine eindimensionale Zeitfunktion sein muss, sondern komplexe Bewertungskriterien für etwas zu Erreichendes enthalten kann. Modelle auf Basis deterministischer, regelungstechnischer Ansätze sind damit kaum zielführend. Diese teils hochspezifischen Modelle ziehen oft eine Vielzahl von Einflussgrößen und Faktoren zur Prädiktion der Fahrerreaktion heran. Mit zunehmender Komplexität der Modelle reduziert sich in den meisten Fällen jedoch auch deren Gültigkeitsbereich, so dass viele von ihnen nur in einigen sehr spezifischen Situationen angewendet werden können. Da das menschliche Verhalten so komplex ist, propa-

gieren sie, dass es vieler unterschiedlicher Modellierungsmethoden bedarf, die durch hybride Simulationsmodelle, in denen unterschiedliche Modellierungsmethoden vereint sind, abgedeckt werden können. Ziel muss es sein, Fahrermodelle mit möglichst vielen intrinsischen Strukturen und Parametern zu erstellen, die mit unterschiedlichen quantitativen Modellierungsmethoden formuliert sind. Das Wissen um den Fahrer ist dabei essentiell. Da auf der einen Seite die möglichen Strategien und Wünsche des Fahrers in Relation zu bestimmten Situationen modelliert werden müssen, andererseits aber auch der Fahrergrundzustand identifiziert werden muss, ist sowohl eine Modellierung von kognitiven als auch motivativen Zuständen des Fahrers notwendig [128].

2.3.6 Unterstützungsmöglichkeiten

Die speziellen Ursachen des Fehlverhaltens im Straßenverkehr liegen nach HACKER im objektiven Fehlen von Informationen, dem Nichtnutzen objektiv vorhandener Informationen und dem falschen Nutzen objektiv vorhandener Informationen [45]. Auch die kapazitive Begrenzung der menschlichen Informationsverarbeitung ist ursächlich für Fehler. Der Mensch muss mit Limitierungen seiner Wahrnehmung, seiner zentralen Verarbeitung und seiner Antwortausführung umgehen. Eine besondere Bedeutung kommt deshalb während des gesamten Handelns der menschlichen Aufmerksamkeit zu. Diese muss ständig den veränderten Zielsetzungen und Umweltbedingungen angepasst werden. In dem Maße, in dem die Handlungen noch nicht automatisiert sind, wird die Aufmerksamkeit in Anspruch genommen. Ist sie durch aufgabenfremde Gegebenheiten gebunden, kann dies bei Überschreiten der Verarbeitungskapazität zu Fehlern in der Handlungsausführung führen [50].

Neue Technik, wie sie Fahrerassistenzsysteme darstellen, kann unter Umständen die Aufgaben des Fahrers und damit auch die Belastung, der er ausgesetzt ist, verändern. Generell können die neuen Aufgabenstellungen leichter oder schwieriger ausfallen als die vergleichbaren Anforderungen bei konventionellen Lösungen. Vormalig galt die Verringerung der Aufgabenschwierigkeit als zielführend, da man von der Annahme ausging, dass der menschliche Fahrer nur über limitierte Ressourcen verfügt. Von Systemen, die wenigstens in Teilen der Fahraufgabe möglichst autonom agierten, versprach man sich niedrigere Fehlerraten des gesamten Fahrer-Fahrzeug-Systems. Dem Fahrer bleibt hierbei die Aufgabe, das System und dessen Systemzustand zu überwachen. Allerdings hat die Entlastung des Fahrers durch Automatisierung negativen Einfluss auf das Situationsbewusstsein („situation awareness“) und wirkt als Folge auftretender Monotonie Probleme in der Aufrechterhaltung der Wachsamkeit („Vigilance“) auf [49]. Der Mensch aber ist ein schlechter Überwacher. Zudem ist davon auszugehen, dass der Benutzer denjenigen Systemen, die zu stark die Autonomie des Fahrers beeinträchtigen, ablehnend gegenüber steht. Nimmt auf der anderen Seite die Belastung des Fahrers durch Nutzung des Systems zu, muss er die Zusatzanforderungen durch vermehrte Anstrengung („mental effort“) bewältigen. Solch größere Anstrengung kostet aber Ressourcen und schlägt sich in der subjektiven Beanspruchung nieder.

Es kann also eine Entlastung oder eine Zusatzbelastung entstehen. Keines der Konzepte ist somit prinzipiell richtig oder falsch, es sollte weder zu einer Unter- noch zu einer Überforderung kommen [33]. Je nach Auslegung des Systems kommen dem Fahrer neben der Fahraufgabe noch verschiedene Rollen zu. Es gibt Fahrerassistenzsysteme, die den Fahrer überwachen. Diese können den Fahrer ohne Eingriff in die Fahraufgabe über Gefahrensituationen informieren bzw. warnen oder gegebenenfalls mit einem korrigierenden Eingriff die richtige Reaktion vorgeben. Der Bediener bleibt Dialogpartner, er muss die Informationen verarbeiten und die richtige Entscheidung treffen.

2.4 Fahrerassistenzsysteme

Nach NAAB ist „der Begriff ‚Fahrerassistenzsysteme‘ (...), obwohl in den letzten Jahren zunehmend verwendet, bisher kaum definiert“ [75]. Diese Aussage - nun schon einige Jahre alt - hat bis heute Gültigkeit. Betrachtet man den Ursprung des Wortes, wird klar, dass Fahrerassistenzsysteme per Definition dazu gedacht sind, dem Fahrer (in unserem Fall dem eines Automobils) Beistand und/oder Mithilfe bei der Erfüllung seiner Aufgabe (in unserem Fall der Fahraufgabe) zu geben. Diese wenig differenzierte Formulierung lässt natürlich zu, dass sich viele technischen Errungenschaften, die zur Verbesserung des Fahrverhaltens, der Sicherheit aber auch des Komforts dienen können, als Fahrerassistenzsysteme bezeichnen lassen. Diesem Umstand verdanken wir die fast inflationäre Verwendung des Begriffes „Fahrerassistenzsysteme“.

2.4.1 Kategorisierung

NAAB & REICHART unterscheiden die diversen Systeme der Fahrerassistenz nach dem Grad des Eingriffs bzw. dem Grad der Automatisierung in mehrere Gruppen (vgl. [76]). *Informierende Systeme* übermitteln dem Fahrer (bei Bedarf) zusätzliche, gegebenenfalls auch bewertete Informationen über spezifische Fahrsituationen, die er schnell und leicht interpretieren, bewerten und in entsprechende Handlungen umsetzen kann. *Servosysteme* erleichtern oder optimieren die vom Fahrer vorgegebenen Betätigungsaktionen. *Automatisch intervenierende Systeme* greifen selbstständig ein, wenn kritische Fahrzustände abzusehen sind. Sie sind in ihrer Wirkung vom Fahrer nicht mehr zu übersteuern. Sie begrenzen insbesondere die Auswirkungen der ohne Intervention im Systemverhalten vorhandenen Nichtlinearitäten so, dass das Gesamtsystemverhalten im Rahmen der Fahrerwartungen gehalten wird. *Automatisch agierende Systeme* führen Aktionen, die vom Fahrer initiiert oder von dessen erkannten Absichten ausgelöst werden, nach seinen Regeln bzw. Anweisungen aus. Die Überwachung und eventuell die Deaktivierung des Systems obliegen ihm auch weiterhin. WÖRSDÖRFER & MAURER ergänzen diesen Ansatz noch um eine fünfte Kategorie. *Autonome Systeme* schließlich sind Systeme, die eine ihnen übertragene Aufgabe völlig selbstständig ausführen, ohne dass sie vom Fahrer im Weiteren überwacht werden müssen [130].

Tabelle 5: Einteilung der Fahrerassistenzsysteme nach dem Grad des Eingriffs nach Wörsdörfer&Maurer

Systemklasse	Beispiel	Grad des Eingriffs
Autonome Systeme	Stauassistent (Längs-und Querführung)	hoch
Autonom agierende Systeme	Tempomat; abstandsgeregeltes Tempomat	
Autonom intervenierende Systeme	Anti-Blockier-System; elektronisches Stabilitätsprogramm	
Servosysteme	Bremskraftverstärker; Servolenkung	
Informierende Systeme	Navigationssystem; System zur Warnung bei drohendem Spurverlassen	niedrig

Das bereits vorgestellte 3-Ebenen-Modell nach DONGES (vgl. Bild 13) kann ebenfalls dazu dienen, die verschiedenen Bereiche der Fahrerassistenz zu strukturieren. Je nachdem, auf welcher Ebene die Systeme mit dem Fahrer zur Bewältigung seiner Fahraufgabe interagieren, spricht man von Systemen, die den Fahrer auf Navigations-, Bahnführungs- oder Stabilisierungsebene unterstützen. Auf Navigationsebene können Systeme zur zeit-, strecken- oder verbrauchsoptimalen Routenwahl den Fahrer unterstützen. Auf Bahnführungsebene werden ihm in Zukunft Assistenten wie der Querführungsassistent zur Seite stehen, die beispielsweise den gewollt initiierten Spurwechsel absichern. Die Stabilisierungsgüte des Fahrer-Fahrzeug-Systems wird bereits heute durch diverse Systeme zur Fahrdynamikregelung erhöht. Die Unterstützung beim Spurhaltevorgang durch den Querführungsassistenten kann, wie nachfolgend gezeigt werden wird, die Sicherheit des Gesamtsystems auf Stabilisierungsebene nochmals erhöhen.

Betrachtet man den zeitlichen Prozess vom normalen, unkritischen Fahren bis zum Eintritt eines Unfalls, kann dieser in die aufeinander folgenden Phasen „normales Fahren“, „kritische Situation“, „Pre-Crash“, „Unfall“ und „Post-Crash“ unterteilt werden. Bild 17 zeigt die Phasen bis zum Unfalleintritt unter Vernachlässigung der Post-Crash Phase und kategorisiert anhand dessen die relevanten Begrifflichkeiten.

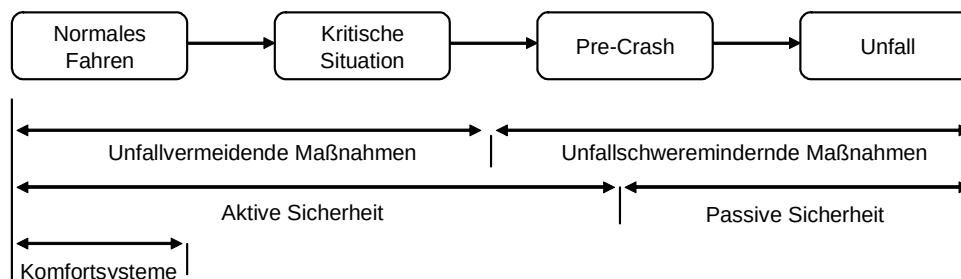


Bild 17: Phasen bis zum Unfallereignis

Maßnahmen der passiven Sicherheit haben zum Ziel, die Folgen des Unfalls zu reduzieren und ein möglichst verletzungsarmes Überleben der Passagiere zu sichern. Ihr Wirkungsfeld beschränkt sich daher auf die eigentliche Unfallphase. Sie können nur dann ihre Wirkung entfalten, wenn ein Unfalleintritt unvermeidbar ist. Fahrerassistenzsysteme greifen hingegen bereits früher ein. Sie unterstützen den Fahrer in der Erledigung der normalen Fahraufgabe, um die Übergangswahrscheinlichkeit zu kritischen Fahrsituationen zu reduzieren. In kritischen Situationen versuchen sie, die Gefahrensituation aufzulösen, einen Unfall zu verhindern und das Fahrer-Fahrzeug-System wieder in den normalen, unkritischen Fahrzustand zurückzuführen. Systemlösungen, die während der Pre-Crash-Phase Maßnahmen treffen, um die Schwere des unausweichlich nachfolgenden Unfalls zu vermindern, werden als Ergänzung der Fahrerassistenzsysteme zur aktiven Sicherheit gezählt (siehe Bild 18).

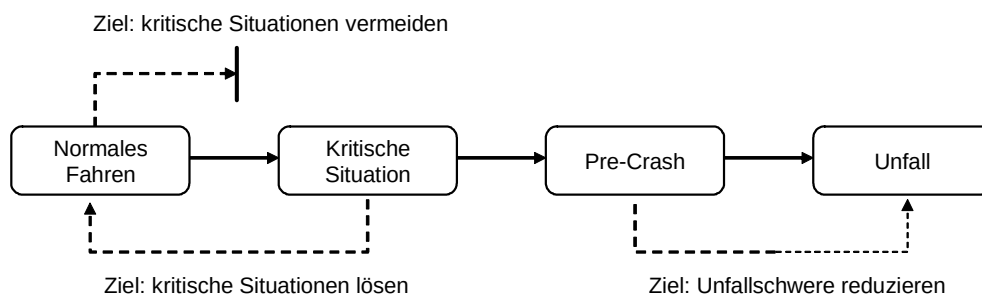


Bild 18: Ziele aktiver Sicherheit

Fahrerassistenzsysteme besitzen je nach Funktionalität und Auslegung einen Charakter, der als eher sicherheitsorientiert oder als eher komfortorientiert bezeichnet werden kann. Ansprüche an Sicherheit und Komfort müssen sich nicht widersprechen, doch ist für reine Sicherheitssysteme ein hohes Maß an Komfortverbesserung zweitrangig. Umgekehrt aber sind die positiven Folgen komfortsteigernder Systeme auf den Zustand des Fahrers und damit auch auf die Verkehrssicherheit nachgewiesen. Die Frage ob ein bestimmtes Fahrerassistenzsystem ein „Komfortsystem“ oder „Sicherheitssystem“ darstellt, ist durchaus relevant, da die meisten Fahrzeughersteller, die die Markteinführung eines Fahrerassistenzsystems anstreben, betonen, dass es sich bei diesem meist nicht um ein Sicherheits- sondern um ein Komfortsystem handelt. Eine absolute Zuverlässigkeit ist nicht sicherzustellen. Die Hersteller müssen bei einem Systemversagen die Folgen der Produkthaftung befürchten und gehen nun davon aus, dass die Folgen eines Haftungsfalles bei einem, auch als solchen angepriesenen Sicherheitssystem deutlich drastischer ausfallen, als wenn ein System auf dem Markt eindeutig als nur komfortsteigernd angeboten wurde. Die Klärung der Produkthaftungsfragen ist und bleibt eine der großen Herausforderungen bei der Markteinführung von Fahrerassistenzsystemen. Solange jeder einzelne Produkthaftungsfall betrachtet wird und nicht die Gesamtbilanz eines Systems aus Nutzen (z.B. Unfallreduzierung) und Kosten (z.B. Anschaffung, systeminduzierte Unfallfolgen) als Bewertungskriterium gilt, ist das

tungskriterium gilt, ist das Risiko der Hersteller, ein Fahrerassistenzsystem anzubieten und zu verkaufen, immens.

2.4.2 Architektur

Den Fahrerassistenzsystemen liegt meist eine ähnliche Architektur zu Grunde. Diese zeigt Bild 19.

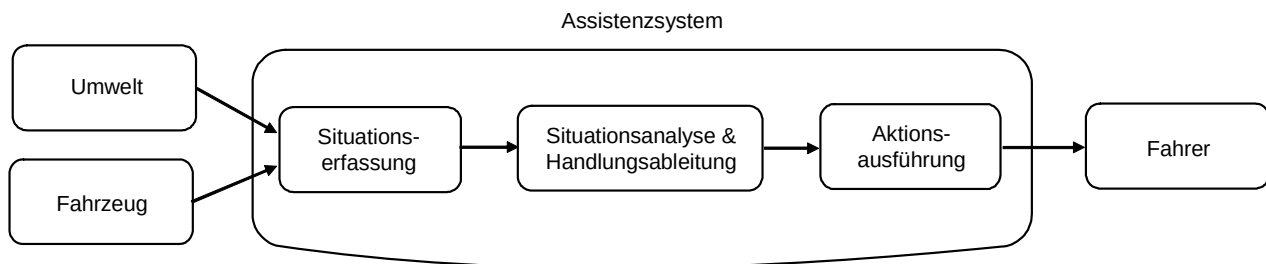


Bild 19: Architektur von Fahrerassistenzsystemen

Fahrzeugzustandssensoren und Umgebungssensoren dienen zur Aufnahme der relevanten Merkmale aus der Umwelt und der Erfassung des eigenen Fahrzustands. Es schließt sich die Verarbeitung der Daten an, wobei in zunehmendem Maße auch Ansätze umgesetzt werden, in der die Informationen, die die einzelnen Sensoren aufgrund ihrer Technologie oder ihres Einbauortes liefern können, vereinen (Sensorfusion). So steht den nachfolgenden, verarbeitenden Einheiten des Systems ein konsistentes Abbild der Umgebung und des Zustands des eigenen Fahrzeugs zur Verfügung. Mit Hilfe dieser Daten wird die Situation analysiert und die Aktionen des Systems werden abgeleitet. Dazu werden beispielsweise Gefährdungsgrade ermittelt oder der gefahrlos befahrbare Raum quantifiziert, um daraus eine möglichst zielführende Reaktion des Systems zu erreichen. Die Aktionsausführung umfasst die Schnittstelle zum Fahrer. Beispielsweise können optische, akustische oder haptische Signale den Fahrer zu einer gefährdungsreduzierenden Aktion bewegen. Aber auch aktive Eingriffe in Bremse, das Motormanagement oder die Lenkung sind hier denkbar. Je nach Ziel, Auslegung und Komplexität des Systems können die beschriebenen Teileinheiten von Fahrerassistenzsystemen nochmals unterteilt oder ergänzt werden. Um eine einheitliche Vorstellung der Architektur von Assistenzsystemen zu garantieren, soll darauf an dieser Stelle verzichtet werden.

2.4.3 Funktionalitäten

Im Folgenden konkretisieren einige Beispiele das Thema Fahrerassistenz und aktive Sicherheit. Die aufgeführten Beispiele erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sie wurden in Hinblick auf eine anschauliche Darstellung des Standes der Technik und im Bezug zum Thema der vorliegenden Arbeit gewählt.

Der *abstandsgeregelte Tempomat*²⁶ gilt als eines der ersten Fahrerassistenzsysteme, das nach erfolgreicher Entwicklung auf dem Markt erhältlich ist und sich im Sortiment einiger Fahrzeughersteller etabliert hat. Dieses System erweitert die Funktionalität eines regulären Tempomaten um eine Abstandsregelung zum Vorderfahrzeug. Bei Erkennung eines vorausfahrenden Fahrzeuges regelt es den Abstand zu diesem durch selbsttätige Eingriffe in die Längsführung auf einen festen, unkritischen Wert ein. Er führt allerdings keine Notbremsmanöver aus: Die Verzögerung, die das System umsetzen kann, bleibt mit einem Wert von etwa 2m/s^2 weit von einer maximal möglichen Bremsverzögerung entfernt. Der abstandsgeregelte Tempomat wird daher als Komfortsystem, weniger als Sicherheitssystem bezeichnet, obwohl LAGES zu Recht anmerkt, dass die Käufer dieses Systems inzwischen einen Sicherheitsanspruch an die Abstandsregelung abgeleitet haben, da es in diversen Veröffentlichungen immer wieder mit der Einhaltung eines Sicherheitsabstandes in Verbindung gebracht wird [62]. Das System deaktiviert sich zurzeit im Niedergeschwindigkeitsbereich. Deshalb wird an einer Erweiterung der automatischen Abstandshaltung bis zum Stillstand gearbeitet. Eine zusätzliche Regelung der Querführung im Niedergeschwindigkeitsbereich erweitert dieses System zu einem *Stauassistenten*, der durch Verknüpfung von Längs- und Querführungsregelung die Fahraufgabe in Stau- oder Stop&Go-Situationen vollautomatisch übernehmen kann. Dieser Funktion werden hohe Marktchancen zugeschrieben, weil sie eine Entlastung in den für viele Fahrer nervenbelastenden Stausituationen verspricht.

Systeme die den Fahrer in kritischen Situationen und instabilen Fahrzuständen unterstützen, einen Unfall vermeiden und das gesamte Fahrer-Fahrzeug-System wieder in den Zustand des normalen Fahrens zurückführen, bilden den Kern dessen, was als Fahrerassistenz bezeichnet wird. Die *Fahrdynamikregelung* hat unter den Systemen der aktiven Sicherheit einen besonderen Stellenwert erreicht. Oftmals erweist sich der Nachweis eines sicherheitserhöhenden Effektes eines Sicherheitssystems auch nach Markteinführung als schwierig. Meist kann nicht ausgeschlossen werden, dass das Vorhandensein eines solchen Systems den Fahrer zu risikokompensatorischem Verhalten verführt und damit den bestehenden Sicherheitsgewinn wieder relativiert. Entgegen vieler Erwartungen gilt die Fahrdynamikregelung als eines der wenigen Systeme, für das man einen hohen Einfluss auf die Verkehrssicherheit nachweisen kann (siehe Kapitel 2.1.3). Das Potential der Fahrdynamikregelung ist noch nicht erschöpft. Zurzeit kommen Systeme der nächsten Generation auf den Markt, die neben dem gezielten Bremseneingriff an einzelnen Rädern auch einen stabilisierenden Eingriff über die Lenkung vornehmen können.

Ist der Unfall nicht mehr zu vermeiden, weil weder eine Vollbremsung noch ein Ausweichmanöver des Fahrers physikalisch und fahrdynamisch erfolgreich sein kann, tritt das Fahrer-Fahrzeug-System in die so genannte „Pre-Crash-Phase“ ein. In dieser Phase können auch technische Systeme den Unfall nicht mehr vermeiden. Trotzdem werden im Rahmen

²⁶ Ein auch unter der Bezeichnung „Abstandsregeltempomat“, „Adaptive Cruise Control (ACC)“, „Automatische Distanzregelung (ADR)“ bekanntes System

der aktiven Sicherheit Systeme entwickelt, die zum Ziel haben, die Unfallschwere sowohl für die Fahrzeuginsassen als auch für eventuelle Kollisionspartner zu reduzieren. Aktuell sind bereits Systeme auf dem Markt, die aus der fahrzeuginternen Sensorik eine Gefahrensituation erkennen können (z.B. beim Eingriff der Fahrdynamikregelung und/oder einer Vollbremsung), eine Maßnahme einleiten und so die Zeit vor einem unabwendbaren Unfalleintritt nicht ungenutzt verstreichen lassen. Sie bereiten das Fahrzeug und den Fahrer für die bevorstehende Kollision vor, indem sie beispielsweise durch das Aufstellen der Sitzlehne die Sitzposition des Fahrers optimieren, den Gurtstraffer aktivieren und durch das Schließen der Fenster und des Schiebedachs zusätzliche Gefahrenquellen ausschließen. Verwenden und klassifizieren solche Systeme zusätzliche Informationen über Objekte im Fahrzeugumfeld, sind weiterführende Systeme zum Schutz der schwächeren Verkehrsteilnehmer denkbar. Systeme zum *Fuß- und Radfahrschutz*, wie sie sich aktuell im Prototypenstadium befinden, heben beispielsweise durch hydraulische oder pyrotechnische Elemente die Motorhaube oder verändern die Verformungsparameter des Frontschwellerbereichs, um bei einer Kollision den Abrollvorgang des Menschen bei Kontakt mit dem Fahrzeug zu optimieren.

Kreuzungssituationen gelten als besonders unfallträchtig [15]. Aus diesem Grund werden Systeme entwickelt, die dem Fahrer in Kreuzungssituationen helfen sollen, seine Fahraufgabe zu meistern und die Kreuzung für ihn und für andere Verkehrsteilnehmer gefahrenfrei zu passieren. Die Erkennung des Ampelstatus, die Erkennung der Vorfahrtsbeschilderung im Kreuzungsbereich und die Weitergabe der jeweiligen Information an den Fahrer werden in Zukunft neben der Warnung vor entgegenkommenden oder kreuzenden Verkehrsteilnehmern und der Unterstützung bei der Orientierung und Navigation an der Kreuzung unter dem Dach einer Art *Kreuzungsassistent* vereint sein. Weitere Systemkonzepte zur Unterstützung des Fahrers während des normalen Fahrvorgangs geben Informationen beispielsweise über die Route, die Beschilderung und den Witterungszustand an den Fahrer weiter (*Navigationssysteme, Straßenzustandserkennung*²⁷, *Verkehrszeichen-erkennung*²⁸). Die damit gewonnenen Informationen können auch zur prädiktiven Anpassung der Geschwindigkeit oder zur Anpassung von Fahrwerks- und Lenkungseigenschaften an verschiedene Fahrzustände (*aktives Fahrwerk* und *aktive Lenkung*) herangezogen werden.

Neben den Servosystemen, die weitgehend autonom einen bestimmten Aspekt der Fahrzeugführung meistern und damit den Fahrer zwar unterstützen, mit ihm aber kaum auf höherer Ebene der Informationsverarbeitung interagieren, und neben reinen Informationssystemen bieten die mit dem Fahrer kooperierenden Systeme ein erhebliches Potential zur Steigerung der Verkehrssicherheit. Diese haben zum Ziel, durch eine fahreroptimierte Anpassung des Automatisierungsgrades und der optimalen Verantwortungsteilung die Stärken des menschlichen Fahrers und des technischen Systems zu bündeln und damit

²⁷ System zur Erkennung der Fahrbahnbeschaffenheit

gemeinsam mit dem Fahrer gleichsam als virtueller Beifahrer die Fahraufgabe zu meistern. Die Unterstützung durch das System ist in verschiedenen Eingriffsarten möglich. Dem Fahrer sollen in kritischen Situationen zielgerichtet die Informationen an die Hand gegeben werden, die er braucht, um die Situation optimal aufzulösen. Auch ein selbsttätiger Eingriff in Teilaufgaben der Fahrzeugführung ist zur Unterstützung des Fahrers möglich. Der in dieser Arbeit thematisierte Querführungsassistent dient hier als Beispiel.

Die vorgestellten Assistenzsysteme müssen in einem Zielkonflikt aus nachweisbarem Sicherheitsgewinn, hoher Kundenakzeptanz und Einhaltung der gesetzlichen Bestimmungen bestehen. Auch wenn bereits an Systemen gearbeitet wird, die in kritischen Situationen automatisch entweder durch ein vollautomatisches Ausweichen oder durch eine vollautomatische Vollbremsung die Kollision vermeiden („*Collision Avoidance*“, „*Ausweichassistent*“), genügen diese Systeme nicht den Anforderungen der Gesetzgebung und des Kunden. Ein Manöver des Systems zur Unfallvermeidung, das sich als nicht notwendig herausstellt oder das gar ursächlich für einen Unfall ist, stellt ein großes Risiko für alle Beteiligten dar. Deswegen steht in der Entwicklung von Assistenzsystemen die Prämisse voran, dass diese vom Fahrer jederzeit übersteuerbar sein müssen, oder wenn dies aufgrund des Automatisierungsgrades oder der notwendigen Reaktionszeit unmöglich ist, erst eingreifen dürfen, wenn keinerlei Möglichkeit mehr besteht, dass der Fahrer die Situation entweder durch Bremsen oder durch Ausweichen ohne Unfallfolge meistern kann. Die Systeme zur Unterstützung des Fahrers in der Querführung versuchen, diesem Ansatz gerecht zu werden. In einem ersten Schritt noch als Spurverlassenswarner und Spurwechselwarner ausgelegt, wird durch stärkere Vernetzung der Komponenten, durch umfassendere Interaktionsmöglichkeiten und mögliche höhere Eingriffsgrade eine kooperative Unterstützung des Fahrers in den querführenden Fahrmanövern Spurwechsel und Spurhalten möglich. Ein solches System wird *Querführungsassistent* genannt.

2.4.4 Aktuelle Systemlösungen

2.4.4.1 Spurverlassenswarner

Der erste in einem Serienfahrzeug verfügbare Spurverlassenswarner wird im „Mitsubishi Proudia“ seit Dezember 1999 ausschließlich auf dem japanischen Markt angeboten. Das System warnt den Fahrer, sobald die „Time To Line Crossing“²⁹ einen Wert ≤ 1 Sekunde annimmt, optisch, akustisch und haptisch vor dem Verlassen der Fahrspur. Das haptische Signal besteht aus einer Kombination von Lenkradvibration und diskreten, kontinuierlichen zu Fahrbahnmitte gerichteten Zusatzlenkmomenten von max. 1,2 Nm. Die Warnsignale wirken für jeweils 1,5 Sekunden. Die Systemlösung baut auf Ergebnissen von MOTOYAMA ET AL. auf [72]. Seine Untersuchungen an einem Fahrsimulator haben ergeben, dass die

²⁸ System zur Erkennung von Verkehrszeichen (insbesondere von Geschwindigkeits- und Vorfahrtsvorgaben)

²⁹ Time to Line Crossing ist die Zeit bis zum Übertritt des Fahrzeugs über die Spurmarkierung (Erklärung siehe Kap. 6.2.2.1)

Kombination aus akustischer Warnung, Lenkradvibration und Lenkmoment im Vergleich zur Kombination aus akustischer Warnung und Lenkradvibration und im Vergleich zur alleinigen, akustischen Warnung zu geringeren Reaktionszeiten führt. Die Reaktionszeit beträgt bei einer Fahrgeschwindigkeit von 70 km/h bei der akustischen Warnung im Mittel rund 0,6 Sekunden, in Kombination mit zusätzlicher Lenkradvibration 0,5 Sekunden und bei der Kombination aus akustischem Signal, Lenkradvibration und Lenkmoment 0,4 Sekunden.

Bereits seit 2002 ist eine Spurverlassenswarnung in Lastkraftwagen der Firma Mercedes Benz erhältlich. Über eine Kamera hinter der Windschutzscheibe und die nachgeschaltete Bildverarbeitung werden die Spurmarkierungen erkannt. Besteht die Tendenz, die Spur zu verlassen, erfolgt eine Warnung über die Radiolautsprecher in Form eines „Nagelbandratens“. Im Jahr 2003 wurde das als „Telligent-Spurassistent“ benannte System in etwas mehr als 2.100 Fahrzeuge verbaut [88]. Bei 249.500 verkauften Nutzfahrzeugen der Marke DaimlerChrysler in Westeuropa [80] entspricht dies einer sehr geringen Ausstattungsquote. Auch die MAN Nutzfahrzeuge AG hat für ihre Produkte mit dem „Lane Guard System (LGS)“ ein annähernd gleiches System im Programm. Es aktiviert sich über 60 km/h automatisch und kann durch einen Kippschalter deaktiviert werden. Die Warnung erfolgt unter 75 km/h an den Innenkanten und über 75 km/h an den Aussenkanten der Fahrspurmarkierungen [84].

Im Jahr 2005 kündigte auch der Fahrzeughersteller Nissan das Debüt ihres „Lane Departure Warning-Systems“ auf dem amerikanischen Markt an [83]. Die Firma zitiert eine Studie der National Highway Transportation Safety Administration (NHTSA) mit Daten aus dem Jahr 2001, nach der 55% aller schwerwiegenden Unfälle in den USA auf ein Spurverlassen zurückzuführen sind. Das kamerabasierte System aktiviert sich ab 45 Meilen pro Stunde (≈ 72 km/h) und warnt den Fahrer im Gefahrenfall über eine optische Anzeige im Instrumentenkombi, dessen Darbietung mit einem akustischen Signal („buzzer“) ergänzt wird.

Auf dem deutschen Markt bietet aktuell der französische Hersteller Citroen mit dem AFIL³⁰-Spurassistenten serienmäßig einen Spurverlassenswarner an [80]. Dieser erkennt mit Hilfe von 6 Infrarotsensoren im Bereich der vorderen Stoßstange die Existenz einer Linie und warnt den Fahrer bei Übertritt und bei Geschwindigkeiten über 80 km/h über Vibrationen im Fahrersitz. Mit dieser Lösung wird der Fahrer erst dann gewarnt, wenn sich das Fahrzeug mit den Rädern auf den Begrenzungsstreifen befindet. Eine Zeitreserve, in der die Reaktionszeit des menschlichen Fahrers berücksichtigt ist, kann mit dieser Art von sensorieller Erfassung der Fahrbahnmarkierungen nicht vorgehalten werden. Die Wahl der Mensch-Maschine-Schnittstelle begründet das Unternehmen damit, dass „an dieser Stelle der Mensch noch empfänglich ist, wenn Augen und Ohren bereits geschlossen sind“ [124].

³⁰ AFIL steht für **A**larm bei **F**ahrbahnabweichung per **I**nfrarot-**L**inienerkennung

Im Rahmen der Auto Show 2005 in Genf stellt auch Volvo Cars seine Interpretation der Systeme zur Unterstützung des Fahrers bei Spurhalten und Spurwechsel vor. Das „Lane Departure Warning“ verwendet eine Kamera im Rückspiegel, die ständig die Straße beobachtet und registriert, wo sich das Fahrzeug im Verhältnis zur Fahrbahnmarkierung befindet. Wenn der Fahrer unkonzentriert ist und die Räder über die Fahrbahnmarkierung geraten, alarmiert ein Warnsummer den Fahrer. Das „Lane Keeping Aid“-System schreitet zusätzlich zum akustischen Signal tatsächlich ein und hilft dabei, das Fahrzeug wieder auf den richtigen Kurs zu bringen. Die Auswirkung auf die Lenkung ist allerdings relativ gering, das Ziel besteht nicht darin, grundsätzlich das Lenken zu übernehmen. Lane Departure Warning und Lane Keeping Aid werden bei einer Geschwindigkeit unter 70 km/h abgeschaltet [85].

2.4.4.2 Spurwechselassistent

Zurzeit befinden sich Spurwechselassistenten bei diversen Herstellern in der Serienentwicklungsphase und sind dort aller Voraussicht nach in den nächsten Jahren verfügbar. Die sensorielle Erfassung der Fahrzeuge auf den Nachbarspuren kann mit Hilfe unterschiedlicher Sensorik erfolgen. Üblicherweise werden hier Radarsensoren oder Lidarsensoren verwendet. Aber auch videobasierte Lösungen sind denkbar. Der Erfassungsbereich, in dem Fremdfahrzeuge erkannt werden können, ist von der verwendeten Technologie abhängig. Vormalig war die Leistungsfähigkeit auf den „Toten Winkel“, also den Bereich neben und knapp hinter dem Fahrzeug beschränkt. Heute arbeiten die Entwickler an einer möglichst großen Reichweite, um auch die auf deutschen Autobahnen üblichen großen Differenzgeschwindigkeiten beherrschen zu können.

2.4.4.3 Spurhalteunterstützung

MEHRING, FRANKE & SUISSA beschreiben bereits 1996 den Ansatz von Mercedes-Benz zur Unterstützung des Fahrers bei der Lenkaufgabe mit Hilfe einer „Optischen Spurhaltung“. Das System soll die Lücke zwischen einem reinen Informations- bzw. Warnsystem und dem vollautomatischen Fahren schließen. Die Evaluierung des Systems erfolgt anhand einer Fahrsimulatorstudie, in der hauptsächlich Gütemaße aus den fahrdynamischen Größen (z.B. Ablagegüte) zur Bewertung herangezogen werden. Mehr als 90% der Versuchspersonen geben an, mit der optischen Spurhaltung weniger Lenkarbeit vollbringen zu müssen. Inwieweit das ein angemessenes Bewertungskriterium darstellt, sei an dieser Stelle dahingestellt. Die Auswertung zeigt weiterhin, dass diejenigen Fahrer, die das neue System ablehnen, sich mehrheitlich als „dynamisch“ charakterisieren [70].

Nissan hat im Januar 2001 als erster Hersteller ein Serienfahrzeug (Nissan Cima) mit einem als Sonderausstattung erhältlichen HC-System auf dem japanischen Markt gebracht. Das System arbeitet bei Geschwindigkeiten zwischen 65 km/h und 100 km/h bei mittleren und großen Kurvenradien auf Autobahnen auf Basis einer CCD-Kamera und synthetischen Unterstützungsmomenten. Es schaltet auch dann nicht ab, wenn der Fahrer die

Hände vom Lenkrad nimmt. In Kombination mit einem ACC-System kann damit ein quasi-autonomes Fahren vom Fahrer eingestellt werden.

KAWAI, ISHIDA & TSUJI beschreiben in ihrer Veröffentlichung das „Lane Keep Assist System (LKAS)“ der Firma Honda [56]. Dieses erkennt mittels einer CMOS-Kamera die Spurmarkierungen und gibt, je nach Ablage des Fahrzeugs aus der Fahrspurmitte, über eine elektrische Lenkung ein korrigierendes Lenkmoment auf. Das Lenkmoment schaltet sich sofort ab, wenn ein plötzlicher Lenkeingriff des Fahrers erfolgt. Sie stellen in einer Versuchsreihe mit 3 verschiedenen Unterstützungsgraden fest, dass das System effektiver ist, je stärker der Assistenzgrad ist, dann allerdings eine Tendenz besteht, sich auf das System zu verlassen und die Fahraufgabe zu vernachlässigen.

Systeme zur automatischen Querführung des Fahrzeugs beschäftigen die einschlägige Wissenschaft schon seit Jahrzehnten. Bereits 1939 wurde die Zukunftsvision einer automatischen Autobahn auf der Weltausstellung in New York einer breiten Öffentlichkeit vorgestellt [34]. Besonders in den USA und Japan wurde die Idee des automatisierten Kolonnenverkehrs in Forschungsprojekten und zahlreichen Veröffentlichungen weiterentwickelt. An dieser Stelle sei auf die Ausführungen in GEHRING verwiesen [41]. Während diese Lösungen noch auf baulichen Maßnahmen in der Infrastruktur (z.B. Leitkabel, Magnetenägel) basieren, bevorzugen die aktuellen Ansätze besonders in der europäischen Entwicklungslandschaft fahrzeugautonome Lösungen. Im Rahmen des europäischen Verbundprojektes PROMOTE CHAUFFEUR wurde beispielsweise an Lösungen gearbeitet, um über eine automatische Längs- und Querführung von Lastkraftwagen einen effizienteren und sichereren Kolonnenverkehr zu ermöglichen. Als stellvertretend für die vielen in der Automobilindustrie und in den Forschungsinstituten entwickelten Versuchs- und Testfahrzeuge zur autonomen Fahrzeugführung seien hier die Fahrzeuge des Lehrstuhls für Systemdynamik und Flugmechanik der Universität der Bundeswehr in München genannt. Das Assistenzsystem DAISY³¹ [60], das den Fahrer durch rechtzeitige Warnungen vor Fehlentscheidungen und Unfällen bewahren will, ebnet den Weg für vollautomatisierte und autonome Systeme wie das VaMORs-P³² [22], das dem Fahrer die Fahraufgabe komplett abnimmt und ihm eine reine Überwachungsfunktion zuweist.

2.4.5 Roadmap

Wie sich die Systeme der Fahrerassistenz entwickeln werden, ist wohl noch so lange ungewiss, bis die ersten Vertreter auf dem Markt eingeführt sind und sich dort bewährt haben. Erst wenn das der Fall ist und die Systeme der ersten Generation bestehen, können darauf aufbauende Funktionalitäten präsentiert werden. Bereits heute wird aber an einer Vielzahl von Systemen gearbeitet.

³¹ DAISY steht für **D**river **A**ssisting **S**ystem

³² VaMORs-P steht für **V**ersuchsfahrzeug für **A**utomatische **M**obilität durch **R**echner**S**ehen-**P**kw

Bild 20 stellt diese Systeme unter Entwicklungs- und Komplexitätsaspekten dar. Die „Roadmap“ ist innerhalb des von der Europäischen Union geförderten, unternehmensübergreifenden Projektes ADASE II³³ entstanden und berücksichtigt bei der Einteilung der verschiedenen Systeme deren Komplexität in Bezug auf gesetzpolitische, technische und nutzerorientierte Aspekte. Sie ist kein Zeitplan für die Markteinführung der Systeme. Besonders Systemen von höchstem Automatisierungsgrad („Autonomous Driving“, „Platooning“, „Obstacle & CA“) werden in überschaubarer Zukunft – durch den kleinen Absatz innerhalb der Abbildung deutlich - keine Chancen auf eine Markteinführung eingeräumt.

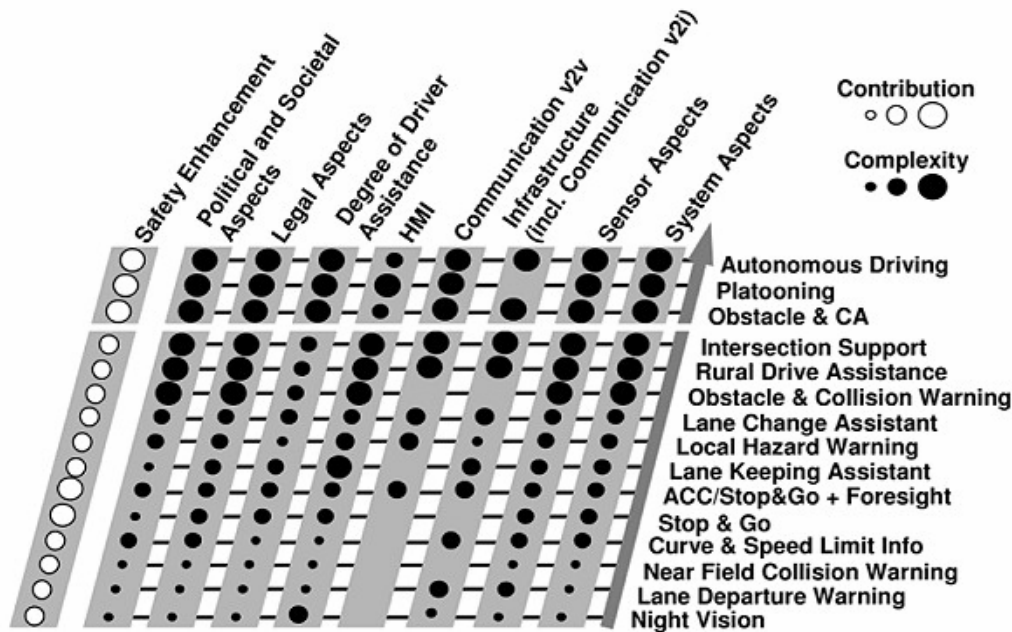


Bild 20: Entwicklungs-Roadmap aus ADASE II

Der innerhalb dieser Arbeit thematisierte Querführungsassistent findet sich in dieser Roadmap als Kombination verschiedener Einzelsysteme wieder. Fasst man die Funktionalitäten „Lane Departure Warning“, „Lane Keeping Assistant“ und „Lane Change Assistant“ zusammen und benennt diese in Summe - ohne die Interferenzen zu berücksichtigen - als Querführungsassistent, wird deutlich, dass dieses Gesamtsystem hohe Anforderungen in den in der Roadmap adressierten Kriterien stellt. Besonders die Mensch-Maschine-Schnittstelle („HMI“) gilt den Gestaltern dieser Roadmap als große Herausforderung für ein solches System.

2.4.6 Mensch-Maschine-Schnittstelle

Zur Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle bei Systemen zur Unterstützung des Fahrers beim Spurhalten und Spurwechsel liegt eine Vielzahl von wissenschaftlichen Veröffentlichungen vor. Zahlreiche Arbeiten beschäftigen sich mit der Frage, welche Signale

³³ ADASE steht für **A**dvanced **D**river **A**ssistance **S**ystems in **E**urope

den Fahrer am schnellsten und effektivsten vor einem ungewollten Spurverlassen warnen oder ihn zum Abbruch eines gefährlichen Spurwechsels veranlassen. Da die Systeme immer höhere Eingriffs- bzw. Automatisierungsgrade erreichen, muss zwingend untersucht werden, wie groß sich die Akzeptanz derartiger hochautonomer Lösungen besonders im Vergleich mit Systemen geringerem Eingriffs- bzw. Automatisierungsgrades aus Sicht potentieller Kunden darstellt.

2.4.6.1 Signalauswahl

SATO ET AL. konnten in ihrer Arbeit zeigen, dass der Zeitpunkt, bis zu welchem die Fahrer im Falle eines ungewollten Spurverlassens mit einer Lenkkorrektur begonnen haben, bei synthetischen diskreten Lenkmomentänderungen sowie bei Lenkradvibrationen früher erfolgt als bei akustischen Warnungen (insbesondere da der Fahrer reagiert, ohne vorher den Blick auf die Straße zu richten) [105]. Problematisch bei der taktilen Warnung durch Lenkradvibrationen ist, dass mit dieser Warnung in der Regel keine Richtungsinformation im Sinne einer Handlungsanweisung an den Fahrer übermittelt wird [16]. Zur Lösung dieses Problems schlagen SATO ET AL. pulsartige, diskrete Lenkmomentänderungen (Signallänge 0,05 Sekunden mit jeweils 0,2 Sekunden Unterbrechung) vor. Diese wirken jeweils in Richtung Fahrbahnmitte. Leider wurde keine Untersuchung durchgeführt, um die Verbesserung gegenüber einer ungerichteten Lenkradvibration zu untersuchen. Versuche mit verschiedenen Signalformen (z.B. Sägezahnfunktionen) erwiesen sich als wenig zielführend.

FERARIC stellt in seiner Arbeit einen Ansatz zur Spurverlassenswarnung vor, der vor dem Verlassen der Fahrspur mit konstanten, zur Fahrbahnmitte gerichteten Lenkmomenten (Amplitude 2 Nm) mit einem überlagerten, pulsierenden Moment (Amplitude 1 Nm; Frequenz 10 Hz) warnt. Bei Untersuchungen im Fahrsimulator zeigt sich, dass die Fahrer im Durchschnitt schon nach 0,33 Sekunden auf das haptische Warnsignal reagieren [35].

ANTONELLO, BOZZO & DAMIANI untersuchten in ihrer Arbeit periodische Lenkmomentänderungen (Amplitude 1,5 Nm; Frequenz 12,5 Hz) als haptisches Warnsignal bei einem Spurverlassenswarner. Die Überprüfung verschiedener Variationen im Rahmen einer Versuchsreihe ergab, dass eine Warndauer von 2 Sekunden von den Versuchspersonen am besten bewertet wird [3]. Zudem wurden Untersuchungen mit diskreten Zusatzlenkmomenten in Richtung Fahrbahnmitte durchgeführt. Diese ergeben, dass bei Variationen der Signalstärke zwischen 2 und 5 Nm und der Signaldauer von 1 bis 5 Sekunden eine Kombination von ca. 4 Nm bei 2 Sekunden Dauer von den Versuchspersonen ausgewählt wird. Sie stellen aber auch fest, dass im Rahmen der Versuche akustische Warnungen von den Versuchspersonen bevorzugt wurden. Sie vermuten jedoch die Ursache in einer schlecht abgestimmten Mensch-Maschine-Schnittstelle.

Untersuchungen am Fahrsimulator von DaimlerChrysler ergaben jedoch auch, dass die Fahrer in der Regel eine akustische Warnung bevorzugen [71]. Die Ursache kann in der

besonderen Situation des Fahrsimulators gelegen haben. In der Wissenschaft werden Ergebnisse von Versuchen an Fahrsimulatoren vereinzelt kritisiert, da es durchaus zweifelhaft ist, ob auch in einem realen Feldversuch gleiche oder wenigstens ähnliche Ergebnisse erzielt worden wären [109]. Trotzdem besteht nach dem Stand der Technik die Möglichkeit, dem Versuchsteilnehmer durch einen geeigneten Simulator und eine geeignete Versuchsauslegung einen sehr realistischen Fahreindruck zu vermitteln.

FAIRBANKS, FAHEY & WIERWILLE versuchten in ihrer Arbeit, optimale akustische Warntöne zur Spurverlassenswarnung zu finden. Sie empfehlen eine Warndauer von 0,8 Sekunden bei einer Frequenz des Warntons von etwa 700 bis 1000 Hz. Die Warnlautstärke sollte 8,1 dBA kleiner sein, als die Lautstärke des Fahrzeugs (bei 100 km/h beispielsweise 73,1 dBA) [31].

Im Gegensatz zu einigen der oben zitierten Quellen fanden POHL & EKMARK in Akzeptanzstudien im Realfahrzeug heraus, dass Testfahrer haptische Warnungen bevorzugen [95]. Die akustischen Warnungen wurden als störend bezeichnet. In der Studie ist weiterhin festgestellt worden, dass das System von vielen Fahrern zum autonomen Fahren missbraucht worden ist.

Haptische Signale können durchaus auch zur Warnung des Fahrers bei absichtlich initiierten Spurwechseln dienen. Dies kann analog zu den Lösungen zur Spurverlassenswarnung entweder durch ein kontinuierliches bzw. kurzzeitiges Gegenmoment oder durch die Vibration des Lenkrades erfolgen. In seiner Arbeit hat KOPF eine Kombination aus Lenkradvibration (Amplitude 4 Nm; Frequenz 15 Hz) und richtungsgebendem Lenkmomentoffset (Amplitude 1,5 Nm) zur Warnung des Fahrers bei Verlassen der Fahrspur bzw. bei gefährlichen oder unerlaubten Spurwechselvorgängen verwendet [60]. Er zeigte, dass in ca. 93% aller Fälle eine Reaktion der Fahrer in die richtige Richtung erfolgte. Der Großteil der falschen Reaktionen ging auf eine Versuchsperson zurück. Je nach Gestaltung der Lenkmomente sind damit keine bzw. nur geringe Gegenlenkreaktionen der Fahrer zu erwarten.

Schuhmann hat zu diesem Thema umfangreiche Untersuchungen durchgeführt [111] [112]. In einem Fahrsimulator sollten die Probanden Spurwechsel in verschiedenen Geschwindigkeitsbereichen durchführen. Bei etwa einem Drittel der Spurwechsel wurde die linke Fahrspur durch ein Hindernis blockiert und die Versuchspersonen wurden durch diverse Signale zum Abbruch des Spurwechsels aufgefordert. Eine Warnung erfolgte dabei 2 Sekunden vor dem Überfahren der Spurmarkierungen. Unterschiedliche Signale sollten damit auf ihre Eignung überprüft werden. Als Signale kamen zum Einsatz: eine Lenkradvibration (Amplitude 1,2 Nm; Signallänge 0,5 Sekunden; Frequenz 10 Hz), eine kontinuierliche Lenkradvibration (Amplitude 1,2 Nm; Frequenz 10 Hz), die solange präsentiert wurde, bis die Quergeschwindigkeit nach rechts einen Wert ≥ 1 m/s erreichte, und eine konstante Lenkmomentänderung (Signallänge 0,5 Sekunden; Amplitude 2,4 Nm), die nach Signalende sanft abklang. Als Vergleichssignal diente ein akustisches Signal (Signallänge 0,5 Sekunden). Die Auswertung ergab aus dem Vergleich von maximalen Lenkradwinkel

bzw. Lenkradwinkelgeschwindigkeiten, dass keines der betrachteten Signale einen negativen Einfluss auf das Lenkverhalten ausübt. Die Betrachtung des minimalen Abstands zur Mittellinie sowie der Reaktionszeiten zeigt aber signifikante Abhängigkeiten vom Warnsignal. Das Signal mit der konstanten Lenkmomentänderung zeigt die kürzesten Reaktionszeiten und die geringste Annäherung an die Mittellinie. Es ist das einzige Signal, das auch bei fehlender optischer Information richtig verstanden wird. Die restlichen Signale können unter diesen Bedingungen ohne optische Information nicht richtig interpretiert werden. Zur Überprüfung der Ergebnisse wurden von SCHUHMAN weitere Untersuchungen mit realen Fahrzeugen vorgenommen, in denen auf einem Handlingkurs gefährliche Überhol Situationen künstlich erzeugt wurden. Die Versuchspersonen wurden entweder durch ein akustisches Signal (Signallänge 0,5 Sekunden) oder durch eine Lenkradvibration (Signallänge 0,7 Sekunden; Frequenz 7 Hz; Amplitude 1,5 Nm) vor einem gefährlichen Spurwechsel gewarnt. Die Warnung wurde 0,75 Sekunden vor dem Überfahren der Spurmarkierung aktiviert. Das Ergebnis zeigt, dass bei taktiler Warnung der gefährliche Überholvorgang deutlich häufiger abgebrochen wird als bei der akustischen Warnung. Dies gilt besonders auch dann, wenn die Versuchspersonen durch Nebenaufgaben abgelenkt waren.

2.4.6.2 Unterstützungsgrad

Zur Darstellung einer Spurhalteunterstützung („Heading Control“) sind Lenkmomente notwendig. Zur Erzeugung der synthetischen Lenkmomente³⁴ in Abhängigkeit von den ermittelten Zustandgrößen bzw. dem errechneten Soll- und Ist-Lenkradwinkel oder Soll- und Ist-Spurverläufen existieren verschiedene Regelstrategien. Fast alle bekannten Varianten basieren auf synthetischen Lenkmomenten, die zusätzlich zu den normalen wirken [16]. Die Lenkmomente weisen häufig eine wannenförmige, nichtlineare Charakteristik auf. Das bedeutet, dass mit zunehmender Differenz zwischen Soll- und Istwert des Lenkradwinkels, der Querabweichung von der Fahrbahnmitte oder der Annäherung an die Fahrbahnbegrenzungen auch die synthetischen Rückstellmomente progressiv zunehmen. Je nach Charakteristik werden dabei bei geringen oder mittleren Abweichungen keine Lenkmomente generiert. Nach PENKA kann man zwei verschiedene Regelstrategien der Spurhalteunterstützung unterscheiden [92]. „Korridorsysteme“ lassen dem Fahrer einen Spielraum oder Korridor in einem Bereich um den Sollkurs, in dem er seine persönliche laterale Position in der Fahrspur verfolgen kann (vgl. Bild 21).

„Permanent mitlenkende Systeme“ versuchen, auch kleine Abweichungen vom Sollkurs korrigierend zu beeinflussen. Die Höhe des eingreifenden Lenkmoments richtet sich nach der Höhe der Winkel- und Spurabweichung. Ein zusätzliches Lenkmoment, das erst an den Fahrspurrändern wirkt, entspricht einer „Error Neglecting Strategy“, während ein früh einsetzendes Lenkmoment einer „Error Correcting Strategy“ entspricht [16].

³⁴ Unter Lenkmomenten sind diejenigen Momente zu verstehen, die um die Lenkachse eines Lenkrades wirken. Unter synthetischen Lenkmomenten sind Lenkmomente zu verstehen, die unabhängig von der aktuellen Fahrsituation und der Stellgröße des Fahrers künstlich aktiv erzeugt oder verändert werden können (Definition vgl. [16]).

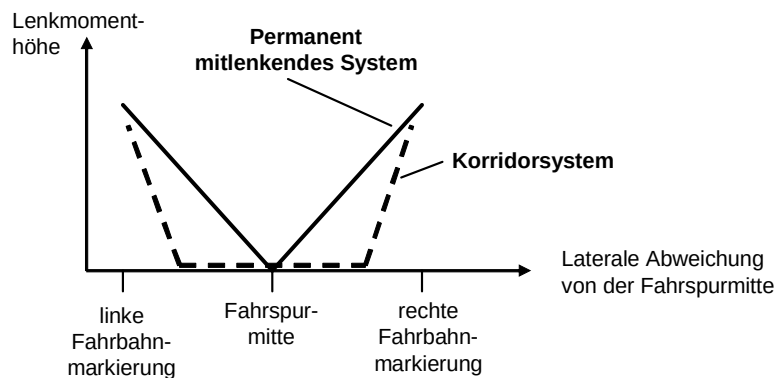


Bild 21: Verschiedene Ausprägungen einer Spurhalteunterstützung

MARSTALLER hat in seiner Arbeit diese zwei verschiedenen synthetischen Lenkmomentencharakteristiken eines Systems zur Spurhalteunterstützung verglichen. Bei der einen Variante wirken die synthetischen Lenkmomente schon bei geringen Querabweichungen, bei der anderen Variante dagegen erst bei größeren Querabweichungen. In einer Leistungsbewertung, die anhand der Kennwerte der Querabweichung sowie der Time-to-Line-Crossing (TLC)³⁵ durchgeführt wurde, erzielte das schon bei geringen Querabweichungen wirkende Spurhalteunterstützungssystem die besten Ergebnisse. Bei der Subjektivbeurteilung wurden dagegen die normale Lenkung und die Spurverlassenswarner am besten bewertet [68].

KRÜGER führte vergleichende Versuche zur Akzeptanz eines Heading Control-Systems mit verschiedenen Lenkmomentencharakteristiken bei Fahrern im wachen und im müden Zustand durch [61]. Die subjektive Bewertung des Systems durch die müden Fahrer ist deutlich schlechter als die von wachen Fahrern. In beiden Fällen wird allerdings ein sanfter, führender Eingriff einem harten, warnenden Eingriff des Systems vorgezogen. KRÜGER befürchtet allerdings, dass die präferierte Systemvariante zu einer Verstärkung der Müdigkeit führen kann und daher im Zustand starker Müdigkeit ein System mit harten Warnungen, das den Fahrer zu eigenem Handeln zwingt, vorzuziehen ist.

Um Anhaltspunkte für den Betrag der notwendigen Lenkmomente in Systemen zur Spurhalteunterstützung gewinnen zu können, führten PANIK & BÖTTIGER Fahrversuche mit einem realen Fahrzeug sowie an einem Fahrsimulator durch. Die Spurhalteunterstützung konnte im Mittel eine Reduzierung der Querabweichung um 87% erreichen. Eine Verdoppelung der Lenkmomente führte zu einer weiteren Verringerung der mittleren Querabweichung, aber auch zu einer Erhöhung der Lenkradwinkel und zu einer Erhöhung des Kraftschlussbedarfs. Die Autoren vermuten, dass nicht die kraftmäßige Unterstützung, sondern die informatorische Hilfe für die Erhöhung der Spurgenaugigkeit maßgebend ist [90].

³⁵ Erklärung siehe Kap. 6.2.2.1

Die Akzeptanz von Spurhalteunterstützungssystemen stellt sich in einigen Versuchsreihen als geringer heraus, als die von Systemen, die den Fahrer nicht permanent bei der Spurhaltung unterstützen und ihn damit weniger stark beeinflussen und bevormunden. In einer Untersuchung von SCHUMANN sowie von SCHUHMAN & NAAB wurde ein Spurverlassenswarner in Fahrversuchen mit einem realen Fahrzeug auf einem Prüfgelände im Vergleich zu einem Heading Control-System sowie im Vergleich zu einem Fahrzeug ohne Assistenzsystem von Versuchspersonen bewertet. Die Leistungskennwerte wurden gegen die Erwartung der Autoren durch den Spurverlassenswarner nicht signifikant verändert, was die Autoren auf die vereinfachte Fahrsituation auf einem abgesperrten Prüfgelände und den ungünstigen Zeitpunkt der Warnung zurückführen. Die Subjektivbeurteilung zeigt, dass diskrete, kurzzeitige Lenkmomentänderungen (Amplitude 3 Nm; Signaldauer 0,8 Sekunden) zur Warnung vor dem ungewollten Verlassen der Fahrspur gut wahrgenommen werden. Die generelle Akzeptanz des Spurverlassenswarners war allerdings relativ gering, wenn auch etwas größer als beim ebenfalls getesteten HC-System [111] [112].

MARSTALLER verglich in seiner bereits zitierten Arbeit auch verschiedene Warnstrategien für einen Spurverlassenswarner im Simulator [68]. Die erste Variante warnt den Fahrer durch die Kombination aus Lenkradvibration und kontinuierlichen, zur Fahrbahnmitte gerichteten Lenkmomenten. Bei zwei weiteren Varianten wurde der Fahrer zu unterschiedlichen Zeitpunkten durch eine Lenkradvibration vor dem Verlassen der Fahrspur gewarnt. Als letzte Variante wurde eine kontinuierlich wirkende Spurhalteunterstützung dargeboten. Bei der Subjektivbewertung sowie der Beanspruchungsbewertung durch Kennwerte zur Lenkaktivität schneiden die Systeme signifikant besser ab, die ausschließlich mit Lenkradvibration arbeiten. Bei der Leistungsbewertung durch die mittlere Querabweichung sowie durch TLC-Maße ergeben sich jedoch signifikante Vorteile für die Systeme mit zusätzlicher oder ausschließlicher, kontinuierlicher Lenkmomentunterstützung.

2.5 Ableitung der Aufgabenstellung

Wie eingangs im Rahmen der Zielsetzung geschildert, hat diese Arbeit zum Ziel, Ansätze und Ergebnisse vorzustellen, wie die Entwicklung eines Querführungsassistenten und dessen fahrergerechte Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle anhand des, dem Systems Engineering entlehnten, problemorientierten Entwicklungspfades (vgl. Bild 1) geschehen kann. Das Bild 22, das die Verbindung der in dieser Arbeit vorgestellten Arbeitsinhalte zum problemorientierten Entwicklungspfad zeigt, soll im Folgenden als Grundlage für die Gliederung der vorliegenden Arbeit dienen.

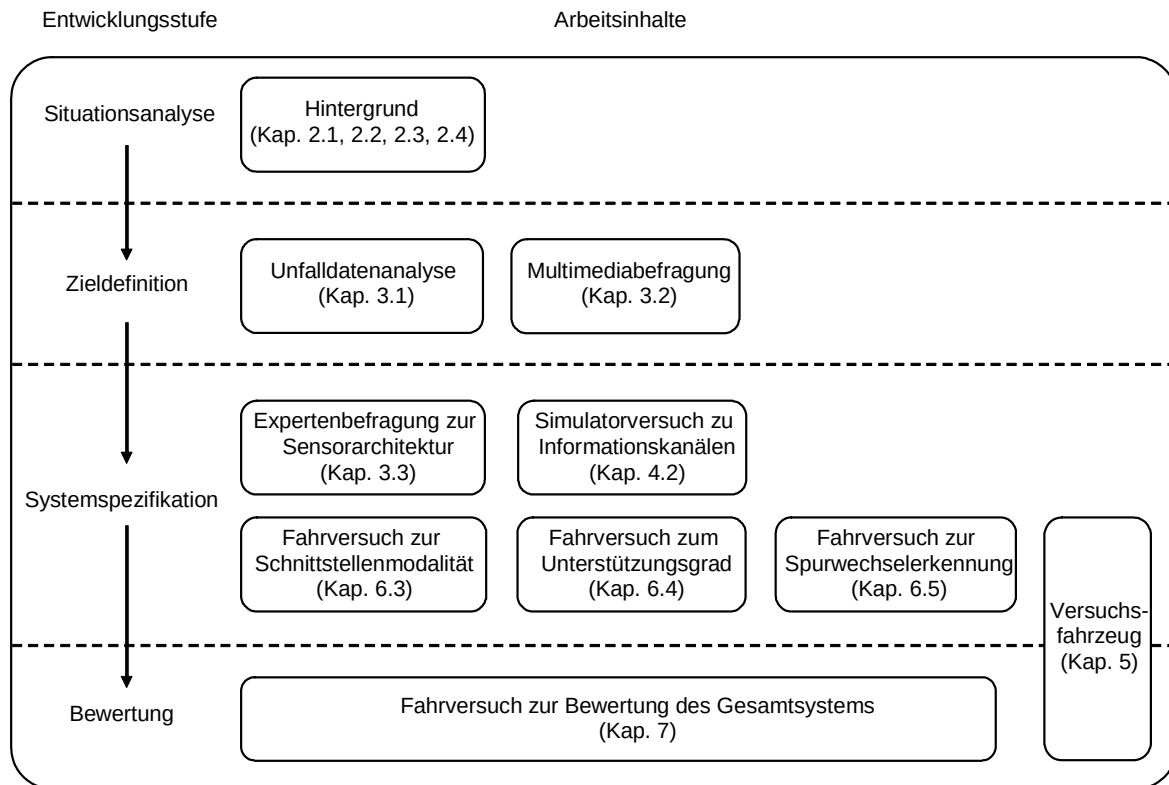


Bild 22: Strukturierung der Arbeitsinhalte anhand des problemorientierten Entwicklungspfades

Die vom Autor durchgeführten Untersuchungen und Fahrversuche, die laut obenstehendem Bild 22 den Entwicklungsstufen „Zieldefinition“ und „Systemspezifikation“ zuzurechnen sind und in den Kapiteln 3 bis 6 beschrieben werden, klären jeweils verschiedene, zur Realisierung des Gesamtsystems notwendige Fragestellungen. Dieses Gesamtsystem Querführungsassistent, ausgelegt aufbauend auf den Ergebnissen der vorangegangenen Untersuchungen und Versuche, wird dann im „Fahrversuch zur Bewertung des Gesamtsystems“ in Kapitel 7 abschließend beurteilt.

2.5.1 Situationsanalyse

Die vorstehenden Ausführungen beschreiben detailliert den Stand der Technik in den Bereichen der Verkehrssicherheit, des Wissens um das menschliches Verhalten und der Funktionalität von Fahrerassistenzsystemen. Systeme zur Unterstützung des Fahrers in der Spurhaltung sind, wie ebenfalls geschildert, bereits in einigen Lastkraftwagen und Personenkraftwagen als Sonderausstattungen käuflich zu erwerben. Die Lösungen unterscheiden sich wie beschrieben deutlich im Funktionsumfang, in der Technologie der verwendeten Sensorik und besonders in der Gestaltung der jeweiligen Mensch-Maschine-Schnittstelle. Systeme speziell zur Unterstützung des Fahrers beim Spurwechsel stehen an der Schwelle zur Markteinführung. Auch hier ist abzusehen, dass sich die Leistungsfähigkeit der einzelnen Lösungen aufgrund der verschiedenen Systemansätze besonders

hinsichtlich der Mensch-Maschine-Schnittstelle und der verwendeten Technologien sehr stark voneinander unterscheiden wird. Aus diesem Grund soll zur Auslegung des Systems nicht auf eine bestehende Lösung zurückgegriffen werden, sondern im Rahmen der Zieldefinition ein eigener Ansatz entwickelt werden.

2.5.2 Zieldefinition

Die Auswertung der relevanten Quellen zeigt, dass alle Anbieter derartiger Unterstützungssysteme von einem großen Unfallreduzierungspotential von Spurverlassenswarner und Spurwechselwarner ausgehen. Diese Aussagen sind oft die Folge der Auswertung von statistischen Großzahluntersuchungen, die sehr undifferenziert Aussagen über den Unfallhergang machen, ohne aber die Unfallursache genauer zu betrachten. So wird in den Analysen des Statistischen Bundesamtes, das auf die Beschreibung der Ordnungshüter vor Ort angewiesen ist, beispielsweise auch ein missglücktes Ausweichmanöver in die Straßeböschung, das vom Fahrer infolge eines Wildwechsels eingeleitet werden musste, als ungewolltes Spurverlassen deklariert. Folglich wird das Unfallreduzierungspotential falsch quantifiziert, da nicht die Unfallursache, sondern die Unfallfolge betrachtet wurde und diese nicht nach ursächlichen Begleitkriterien (z.B. Baustelleneinfluss, Straßenverhältnisse) ausgewertet werden kann. Dem geschilderten Sachverhalt soll in dieser Arbeit Rechnung getragen werden, indem das Sicherheitspotential des Querführungsassistenten anhand der GIDAS⁴-Datenbank analysiert wird. Sie erlaubt einen dezidierten Aufschluss über die Unfallursache und die Begleitumstände und ist zudem repräsentativ für die bundesdeutsche Situation (siehe Kap. 3.1).

Die im Rahmen der Zieldefinition zu entwickelnden Ziele beschreiben ein Assistenzsystem, das sowohl die Aspekte des Kunden (z.B. Kaufpreis, Sicherheitssteigerung), des Herstellers (z.B. Entwicklungs- und Herstellungskosten, Imagegewinn), sowie anderer betroffener Parteien aus Staat und Gesellschaft (z.B. Gesetzgebungskonformität, Einfluss auf den Verkehrsfluss) berücksichtigt (siehe Bild 23).

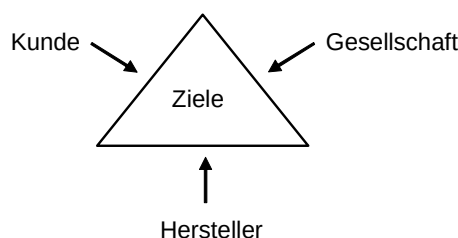


Bild 23: Einflussfaktoren auf den Zielekatalog

Die unterschiedlichen Systemansätze und die teilweise sehr niedrigen Ausstattungsraten bestimmter Systeme offenbaren ein weiteres Problem. Der frühzeitigen Analyse der Kundenwünsche wird wenig Beachtung geschenkt. Die Ausgestaltung der technischen Lösung ist zu sehr von technischen und ökonomischen Kriterien abhängig. Aus diesem Grund soll

hier die Analyse der Kundenwünsche bereits in einem sehr frühen Entwicklungsstadium erfolgen. Im Rahmen einer Multimediabefragung soll die Kundenpräferenz zu ausgewählten Gestaltungskriterien des Querführungsassistenten erfragt werden. Dazu wurden Ansätze entwickelt, um auch unerfahrenen Probanden ohne Veranschaulichung durch einen Versuchsträger oder ähnliche Exponate die komplexe Funktionalität des Assistenzsystems verständlich machen zu können. Mit diesem Wissen sind die Befragten in der Lage, ihre präferierte Systemfunktionalität festzulegen, welche folglich direkt in die Konkretisierung der Systemspezifikation einfließen kann (Kap. 3.2).

2.5.3 Systemspezifikation

Die Ziele skizzieren einen Assistenzansatz, der in einem nächsten Schritt in ein technisches System umgesetzt werden muss. Dabei ist klar, dass nicht alle Anforderungen der beteiligten Interessenvertreter berücksichtigt werden können, da der Hersteller neben ökonomischen Gesichtspunkten nur Lösungen umsetzen kann, die auf dem verfügbaren Stand der Technik aufbauen. Bild 24 verdeutlicht diesen Zusammenhang. Der Prozess der Systementwicklung stellt eine Art Filter dar. Die Herausforderung besteht darin, möglichst viele der vorher definierten Ziele in die Systemerstellung einfließen zu lassen und deren Erreichung durch das Assistenzsystem sicherstellen zu können.

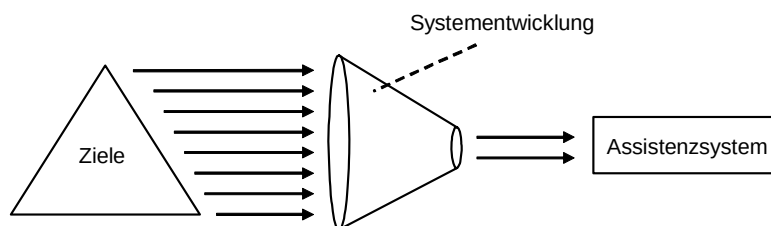


Bild 24: Prozess der Systementwicklung

Die Leistungsfähigkeit des Assistenzsystems ist direkt von der Leistungsfähigkeit der verwendeten Sensorik abhängig. Je nach Sensortechnologie können unterschiedliche Gefahrensituationen adressiert und verschiedene Eingangsgrößen berücksichtigt werden. Die unterschiedlichen Lösungen zur Detektion des ungewollten Spurverlassens beispielsweise über videobasierte Lösungen (DaimlerChrysler, MAN, Infiniti) oder über Infrarotsensoren (Citroen) lässt Raum für einen klärenden Beitrag. Um die zielführende Sensorik des Querführungsassistenten festlegen zu können, werden AUDI-interne Experten zu ihrer Meinung bezüglich verschiedener Sensortechnologien befragt. Das Ergebnis stellt ein Kriterienkatalog zur Bewertung der Sensortechnologien in Applikationen der Fahrerassistenz („Allgemeiner Kriterienkatalog“) sowie zur Verwendung in einem Querführungsassistenten dar („Spezieller QFA-Kriterienkatalog“). An diesen sollen die verfügbaren Sensortechnologien gespiegelt und ein Vorschlag für die Sensorikplattform abgeleitet werden (siehe Kap. 3.3).

Der Mensch muss im Zentrum der Entwicklung stehen. Dies zeigen die Betrachtungen Betrachtung des Standes der Technik und besonders die umfassenden Ausführungen zum Menschen als Fahrzeugführer. Wie bereits betont, wird auf diesen Sachverhalt zu wenig eingegangen. Die breite Verwendung akustischer und optischer Signale bei gleichzeitiger Vernachlässigung haptischer Signale in den bisher vorgestellten Systemlösungen kann nicht allein mit dem höheren technologischen Aufwand beispielsweise für eine elektrische Lenkung erklärt werden. Vielmehr ist trotz zahlreicher wissenschaftlicher Veröffentlichungen wenig über die Charakteristik der verschiedenen Informationskanäle des Menschen bekannt. Akustische Signale, wie jenes in Lastkraftwagen angebotene „Nagelbandrattern“, zeichnet ein hoher Warncharakter aus. Ob sie ebenfalls für die Verwendung in einem Personenwagen, dessen Fahrer ein sicher erhöhtes Bedürfnis nach Komfort und Hochwertigkeit auszeichnet, geeignet sind, scheint mehr als fraglich. Aber auch die bisherigen haptischen Lösungen, die in einigen der Systeme zur Spurverlassenswarnung implementiert sind, lassen Raum für Verbesserungen, da offensichtlich noch kein lösungsübergreifendes Verständnis zu Ort und Gestaltung des Signals existiert. Aus diesem Grund soll speziell zur Verwendung im Querführungsassistenten anhand eines Versuchs im Fahrsimulator untersucht werden, welches Warnsignal zu einer schnellen und richtigen Reaktion des Fahrers bei kritischen Situationen in der Querführung führt (siehe Kap. 4.2).

Untersuchungen in virtueller Umgebung z.B. in Fahrsimulatoren können dazu dienen, grundlegende Fragestellungen zur Gestaltung der Signale und Auslegung des Assistenzsystems zu beantworten. Die Komplexität menschlichen Verhaltens während der Fahrzeugführung und der hohe Interaktionsgrad zwischen einem Querführungsassistenten und dem menschlichen Fahrer verlangen eine intensive Betrachtung der Zusammenhänge in Situationen des realen Straßenverkehrs. Aus diesem Grund sollen die folgenden Fragestellungen anhand eines Versuchsträgers beantwortet werden, der auf öffentlichen Straßen im Rahmen von umfangreichen Probandenversuchen Ergebnisse zur Systemfunktionalität und zur Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle liefern kann. In der einschlägigen wissenschaftlichen Literatur ist eine deutliche Tendenz zur Validierung der Systemansätze in Rechnersimulationen und in Fahrsimulatoren festzustellen. Der Versuchsträger soll nun aber dort valide und realitätsnahe Ergebnisse erlauben, wo andere, realitätsfernere Methoden nur ein verfälschtes (vielmehr idealisiertes) Bild der Leistungsfähigkeit des Systems zeichnen würden (siehe Kap. 5).

Der Querführungsassistent kann als Kombination verschiedener Systemansätze betrachtet werden und beinhaltet sowohl die Systemfunktionalität der Spurverlassenswarnung wie die eines Spurwechselassistenten. Aus dem Zusammenwachsen mehrerer Teilfunktionalitäten können Synergieeffekte entstehen, die bisher in der wissenschaftlichen Literatur nicht umfassend beleuchtet wurden. Beispielsweise kann die Verwendung verschiedener Sensoren im Rahmen einer Sensorfusion ein Umfeldmodell ermöglichen, in dem die Sensorsignale deutlich valider sind als bei den Einzelsystemen. Das Zusammenwachsen mehrerer Teilapplikationen zu einem Querführungsassistenten macht eine konsistente Warnstrategie und Weitergabe dieser über die Systemaktionen notwendig. Eine Vereinheitli-

chung der Schnittstellen kann bestimmte Informationskanäle entlasten und eine intuitivere, schnellere Reaktion ermöglichen. Eine Schlussfolgerung ist, die gesamte Systemausgabe beispielsweise über einen Informationskanal abzuwickeln. Dazu existiert bisher keine wissenschaftliche Literatur: die Teilfunktionalitäten und deren jeweilige Mensch-Maschine-Schnittstelle sind bisher isoliert betrachtet worden. In einer Untersuchung soll nun geklärt werden, ob die Darbietung einer komplexen Funktionalität auch über eine unimodale Schnittstelle möglich ist oder ob mehrere auch redundante Signale zielführend sind (siehe Kap. 6.3)

Die Steigerung des Automatisierungsgrades- bzw. Unterstützungsgrades wird immer als ein logischer, technologischer Fortschritt in der Entwicklung der Assistenzsysteme gesehen. Ein höherer Unterstützungsgrad muss aber nicht automatisch mit einer niedrigeren Fehlerrate des gesamten Mensch-Maschine-Komplexes einhergehen. Ansätze zur Automatisierung der Spurhaltung sind mehrfach dokumentiert. Ansätze zur Automatisierung des Spurwechsels sind technisch machbar. Inwieweit dies aber den Kundenwünschen entspricht und damit auch als benutzergerechte Auslegung verstanden werden kann, soll wiederum anhand eines Fahrversuches geklärt werden, in dem die Akzeptanz derartiger, hochautonomer Unterstützungssysteme hinterfragt werden soll (siehe Kap. 6.4).

Fahrermodelle nehmen - wie geschildert - einen großen Raum in der wissenschaftlichen Diskussion ein. Bis vor einigen Jahren galt eine adaptive Systemauslegung als eines der übergeordneten Ziele von Systemen, die sehr stark mit dem Fahrer interagieren. Das System sollte sich dem Kunden anpassen. Die Adaptionfähigkeit des Menschen, die Leistungsfähigkeit des menschlichen Bedieners also, sich einem System anpassen zu können, wurde dabei ignoriert. Bei der Systemauslegung des Querführungsassistenten stellt sich folgende Frage: Wie kann man ein ungewolltes Abkommen von der Fahrbahn von einem absichtlichen Spurwechsel unterscheiden, wenn der Fahrer nicht durch die Blinkerbetätigung einen eindeutigen Indikator für einen absichtlichen Spurwechsel gibt? Ansätze auf Basis von fahrzeuginternen Größen erwiesen sich als wenig zielführend. In einem Fahrversuch soll nun aber ein Ansatz auf seine Kundenakzeptanz überprüft werden, in dem ausgehend von der Analyse der Umgebungssituation ein Spurwechselwunsch abgeleitet werden kann (siehe Kap. 6.5).

2.5.4 Bewertung

Systemspezifikation und Bewertung werden in dieser Arbeit nicht getrennt behandelt, vielmehr muss sich jeder Spezifizierungsansatz einer unmittelbaren Bewertung stellen (siehe Fahrversuche). Zur Bewertung des Gesamtsystems Querführungsassistentz dient ein abschließend beschriebener Fahrversuch, der den Querführungsassistenten in einem aus den vorangehenden Untersuchungen und Versuchen hergeleiteten Systemumfang hinsichtlich verschiedener Kriterien mit Hilfe einer repräsentativen Versuchsfahrergruppe möglichst umfassend bewertet (siehe Kap. 7).

3 Querführungsassistent

Bereits in einem frühen Entwicklungsstadium sollen mit geeigneten Maßnahmen Zusammenhänge zwischen der Systemfunktionalität und der sicherheitfördernden als auch der ökonomischen Wirkung des Systems identifiziert werden. Diesem Ziel wird im Folgenden mit einer detaillierten Unfalldatenanalyse Rechnung getragen. Daran schließt sich die Analyse der Kundenwünsche im Rahmen einer Multimediabefragung an. Die Ergebnisse, die im Rahmen dieser beiden Untersuchungen gewonnen werden, fließen direkt in die Konkretisierung der Systemspezifikation ein. Diese gilt es anschließend in eine technische Lösung zu übertragen. Als Methode zum strukturierten Vergleich verschiedener technischer Realisierungsoptionen unter den in der Analyse der Unfallzahlen und der Kundenwünsche erarbeiteten Aspekten, dient eine Expertenbefragung dazu, die Sensorplattform des Querführungsassistenten festzulegen.

3.1 Unfalldatenanalyse

Die Analyse von Straßenverkehrsunfällen stellt als Teil der Situationsanalyse eine der Grundlagen für die Spezifikation eines Fahrerassistenzsystems dar. Ein bereits abschließend spezifiziertes System mit dem tatsächlichen Unfallgeschehen zu vergleichen und damit nachträglich zu versuchen, es anhand des Sicherheitspotentials zu argumentieren, ist nicht zielführend. Eine Systementwicklung, die ihren Fokus in der Betrachtung von technisch Machbarem und von aktuell verfügbarer Technik hat und die Spezifikation nicht aus Fehlern und Fehlerfolgen des menschlichen Fahrers ableitet, wird einen nur suboptimalen Einfluss auf die Verkehrssicherheit aufweisen. Die Unfalldatenanalyse soll hierbei den Ausgangspunkt der Systementwicklung darstellen. Die Analyse von Unfalldaten bietet die Möglichkeit, bereits in einem sehr frühen Stadium der Entwicklung den erwarteten Sicherheitsnutzen abzuschätzen. Die Erkenntnisse aus der Unfalldatenbetrachtung sollen laufend mit den verschiedenen Entwicklungsständen des Assistenzsystems verglichen und falls notwendig und technisch möglich, die Systemspezifikation darauf hin angepasst werden.

3.1.1 Unfalldatenerhebung

Die Sammlung der Verkehrsunfallzahlen und ihrer Merkmale beginnt in der Regel durch die Polizei an der Unfallstelle. Den Statistiken des Statistischen Bundesamtes liegen dann diese polizeilichen Verkehrsunfallanzeigen mit 50 bis maximal 200 Parametern zu Grunde. Das Unfallgeschehen wird von vielen Einflussfaktoren bestimmt, die nicht alle aufgenommen oder nachvollzogen werden und damit die Genauigkeit der amtlichen Unfallstatistik einschränken. Durch die bundesweit umfassende Datenerhebung ist dieses Material jedoch statistisch abgesichert und liefert einen guten Überblick über das Unfallgeschehen (siehe Kap. 2.1). Für die detaillierte Betrachtung der Einzelunfälle fehlen bei dieser Unfall-

datenerhebung jedoch eine Reihe wichtiger Informationen, weswegen das durch die polizeiliche Unfallaufnahme vorliegende Maß an Genauigkeit nicht zu einer weiterführenden Bewertung von Maßnahmen der aktiven Sicherheit ausreicht.

„*Retrospektive Großzahluntersuchungen*“ beziehen sich auf die Unfallerhebungen, die meist von privatwirtschaftlicher Seite vorgenommen werden und einen informativen Einblick in Teilbereiche des Unfallgeschehens ermöglichen [107]. Beispielsweise gewinnen Versicherungsunternehmen Akteneinsicht in Straf- und Zivilakten und erstellen für ihre Belange der Schadensregulierung Aktenauszüge. Der Datenumfang erhöht sich gegenüber der amtlichen Unfallstatistik etwa um das Dreifache. Die nachträgliche Auseinandersetzung mit dem Einzelunfallereignis mit Hilfe von Gerichtsakten, Obduktionsberichten, Sachverständigengutachten und versicherungseigenen Fragebögen schränkt deren Aussagekraft jedoch deutlich ein. Obwohl eine große Anzahl an Fällen zur Verfügung steht, liegt der Fokus der Datenerhebung auf der Unfallfolge. Rückschlüsse auf die unfallauslösenden Fehler und Fahrhandlungen sind kaum möglich.

Bei den „*In-Depth Studien*“ handelt es sich um prospektive, örtliche Unfallerhebungen realer Unfälle unmittelbar nach dem Ereignis am Ort des Geschehens. Durch eine umfangreiche Datenaufnahme, die technische, medizinische und verkehrspsychologische Unfallaspekte berücksichtigt, erfolgt eine möglichst genaue Erfassung, Analyse und Rekonstruktion des Unfalls. Zahlreiche Automobilhersteller betreiben derartige Unfalluntersuchungen, meist aber mit der Beschränkung auf Unfälle, bei denen eigene Fahrzeuge beteiligt sind. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse dienen hauptsächlich der sicherheitstechnischen Optimierung der eigenen Fahrzeuge und der Effizienzprüfung der bereits umgesetzten Maßnahmen. Die nachfolgend vorgestellten Analysen basieren auf Daten, die von der GIDAS⁴ erhoben werden. Dieses Projekt entstand aus Aktivitäten der Medizinischen Hochschule Hannover (MHH), welche bereits seit den 70er Jahren im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen Verkehrsunfälle untersucht und dokumentiert. Im Jahr 1999 wurde das Erhebungsgebiet um den Großraum Dresden erweitert, die Erhebung dort wird durch die Technische Universität Dresden durchgeführt. Die Verkehrsunfälle werden nach einem Stichprobenverfahren erfasst. Die Aufnahmeteams rücken aus, wenn sich während der Erhebungsschicht ein Straßenverkehrsunfall im Großraum Hannover oder Dresden ereignet, bei dem mindestens eine Person verletzt wird. Durch die Organisation der Erhebungsschichten und durch den Vergleich mit der amtlich erfassten Unfallstruktur für das jeweilige Erhebungsgebiet ist die Datenbank nahezu repräsentativ für die nationale Statistik von Unfällen mit Personenschäden. Die Zahlen können mit Hilfe von Umrechnungsfaktoren auf die gesamtdeutsche Situation hochgerechnet werden. Die Anzahl der Fälle, die in der GIDAS-Datenbank hinterlegt ist, ist zudem hoch genug, um statistisch signifikante Aussagen treffen zu können. Jeder Fall ist mit 500 bis 3.000 Informationen sehr detailliert dokumentiert, so dass neben Unfallfolgen auch Rückschlüsse auf unfallauslöser und Unfallhergang analysiert werden können.

3.1.2 Untersuchungsziel

Die nachfolgend vorgestellte Unfalldatenanalyse hat zum Ziel, den in der GIDAS-Datenbank codierten Pool an Unfällen hinsichtlich der Einzelunfallereignisse auszuwerten, die durch einen Querführungsassistenten potentiell beeinflusst werden können. Damit kann dessen Wirkungsfeld quantifiziert werden. Der Querführungsassistent wird dabei definiert als ein System, das den Fahrer beim Spurhalten und bei der Durchführung der Spurwechsel unterstützt. In einem ersten Schritt soll keine Beschränkung des Systems hinsichtlich verschiedener Einsatz- bzw. Umgebungsvariablen (z.B. Funktion nur auf Autobahnen, nur tagsüber, nur bei klarer Sicht) angenommen werden. Aus dieser Definition heraus können damit in einer für diese Analyse ausreichenden Näherung diejenigen Unfälle betrachtet werden, die auf Fehler in der Spurhaltung und beim Spurwechsel zurückzuführen sind. Die Aufbereitung und Auswertung der Daten erfolgte durch den Autor. Im Rahmen der Untersuchung sollten einige Hypothesen auf ihre Haltbarkeit untersucht werden, um daraus die Spezifikation des Querführungsassistenten zu konkretisieren.

Nach Analysen des ADAC sind 1989 von Unfällen mit Personenschaden auf Autobahnen 32,4% durch Abkommen von der Fahrbahn und 8,8% durch Kollisionen mit einem Fahrzeug, das seitlich in die gleiche Richtung fährt, entstanden [60].

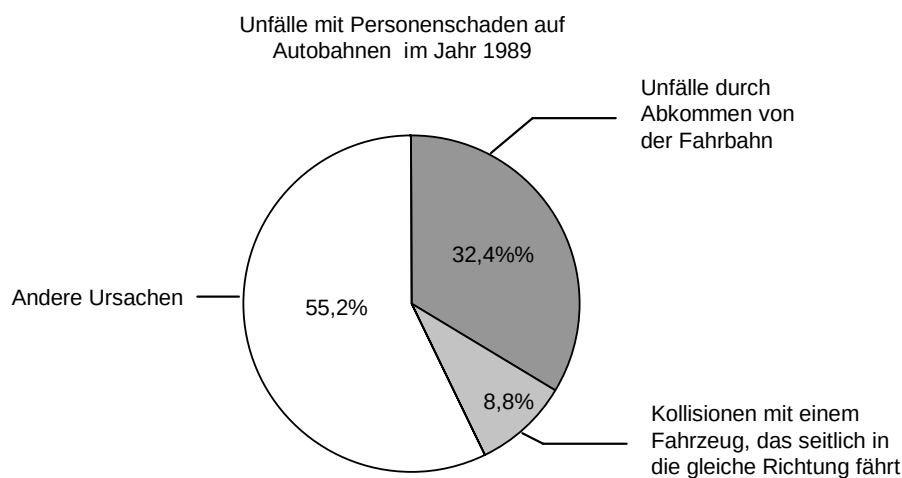


Bild 25: Anteil der Spurverlassens- und Spurwechselunfälle an allen Unfällen mit Personenschäden auf Autobahnen im Jahr 1989

Damit liegt nach Überprüfung der bestehenden Veröffentlichungen folgende Hypothese nahe:

Hypothese 3.1-1: Unfälle in der Querführung (Spurverlassensunfälle und Spurwechselunfälle) nehmen einen deutlichen Anteil am gesamten Unfallgeschehen ein.

Bestätigt sich diese Hypothese, hat ein Querführungsassistent, der Spurverlassens- und Spurwechselunfällen vorbeugen kann, ein großes, potentielles Wirkungsfeld. Die innerhalb der Datenbank identifizierte Teilmenge an querführungsrelevanten Unfällen wird im Anschluss näher betrachtet, um so eine Charakterisierung dieser Unfälle hinsichtlich typischer Kriterien (z.B. bezüglich Fahrzeugkonstellation, Unfallschwere, Unfallort, Sichtverhältnisse, Fahrertyp) zu erlauben. Als Hypothese ergibt sich daraus:

Hypothese 3.1-2: Unfälle in der Querführung (Spurverlassensunfälle und Spurwechselunfälle) zeichnen sich durch charakteristische Merkmale aus.

Die Spezifikation des Querführungsassistenten muss anhand dieser charakteristischen Merkmale erfolgen. Ein Augenmerk liegt auf denjenigen Kriterien, die sich im Vergleich der Querführungsunfälle zur Gesamtunfallsituation unterscheiden.

3.1.3 Untersuchungsmethodik

Für diese Arbeit stand dem Autor die GIDAS-Datenbank mit einem Stand des Jahres 2003 mit 18.251 Unfällen, 15.208 beteiligten Fahrzeugen und 46.446 beteiligten Personen zur Verfügung³⁶. Die Einzelunfallereignisse sind in der GIDAS-Datenbank mit einer großen Anzahl an Variablen codiert, jede beteiligte Person erhält zusätzlich einen eigenen Datensatz.

Aus der Gesamtheit aller Unfälle werden nun die Unfälle herausgefiltert, die auf ein unbeabsichtigtes Spurverlassen und Fehler in der Spurwechseldurchführung zurückzuführen sind. Die in der Datenbank für jeden Unfall codierte Variable „*Unfalltyp*“ beschreibt, welche Situation primär unfallauslösend wirkte. Der Unfalltyp wird nach dem erweiterten Unfalltypenkatalog des HUK³⁷-Verbandes in einer Ausgabe vom Januar 1977 verschlüsselt. Der Unfalltyp bezeichnet den Verkehrsvorgang bzw. die Konfliktsituation, woraus der Unfall entstanden ist. Die Variable beschreibt nicht, welche Situation sich zum eigentlichen Kollisionszeitpunkt darstellte (z.B. Frontalanprall an Baum), sondern welche Ursache zu der Konstellation geführt hat (z.B. Ausweichen wegen eines Fußgängers auf der Fahrbahn). Sie beschreibt die Ursache und nicht den Effekt und hat damit mehr Aussagekraft, als die Statistiken, die auf polizeiliche Erhebungen zurückzuführen sind und meist die unfallauslösenden Faktoren nicht eingehend beleuchten.

Mit Hilfe der Variable *Unfalltyp* ist es nun möglich, aus dem Unfalldatenpool die Unfalldatensätze herauszuarbeiten, die auf Fehler beim Spurwechsel zurückzuführen sind. Der Pool dieser Unfälle wird im Folgenden als *Spurwechselunfälle* bezeichnet und näher untersucht.

³⁶ Gesammelte Unfallereignisse im Untersuchungszeitraum seit 1973. Seit 1999 werden im Rahmen der GIDAS etwa 2.000 Unfälle im Jahr codiert.

³⁷ alte Bezeichnung für den Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV).

Bild 26 zeigt eine Übersicht über die einzelnen Unfalltypen, die in Summe die im Folgenden näher betrachteten Spurwechselunfälle bilden. Es gilt die Einschränkung, dass kein Schleudervorgang ursächlich an der Unfallentstehung beteiligt sein darf, ein Spurwechsel also nicht auf eine fahrdynamische Grenzsituation, sondern auf Absicht des Fahrers zurückzuführen ist.

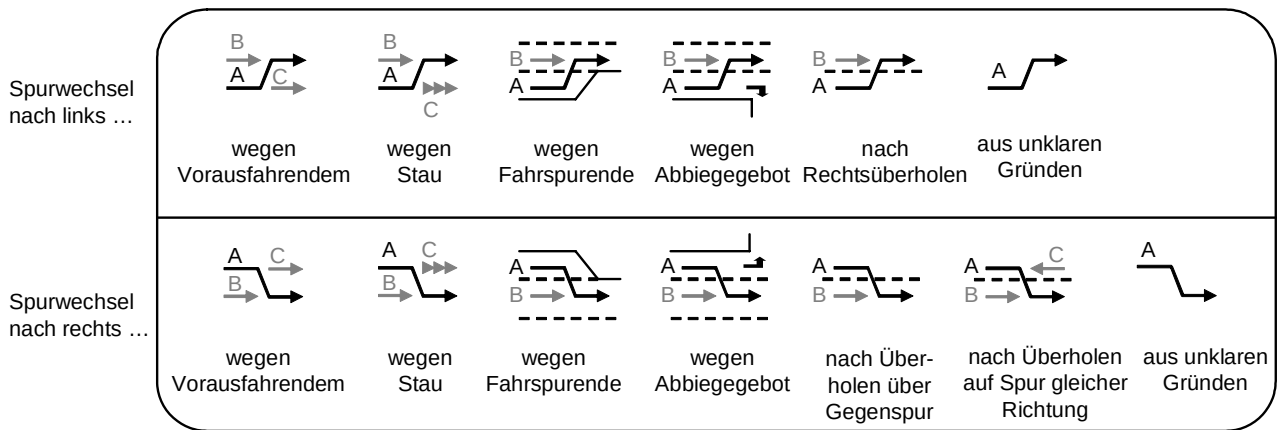


Bild 26: Spurwechselunfälle

Mit Hilfe der Variable Unfalltyp können auch die Spurverlassensunfälle aus der gesamten Unfalldatensammlung herausgefiltert werden. Der Unfalltyp „*Fahrerunfall*“, der als ein unbeabsichtigtes Spurverlassen in der Datenbank codiert ist, beinhaltet aber zusätzlich beispielsweise noch die Unfälle, bei denen das Spurverlassen auf einen Schleudervorgang zurückzuführen ist. Das in diesem Kapitel zu konkretisierende Assistenzsystem wird in solchen Fällen nicht eingreifen können, da die Fahrdynamikregelung (ESP) bereits die Aufgabe der Schleuderkontrolle erfolgreich übernommen hat. Deshalb gilt auch hier das Filterkriterium, dass das Spurverlassen nicht auf ein Schleudern des Fahrzeugs zurückzuführen sein darf.

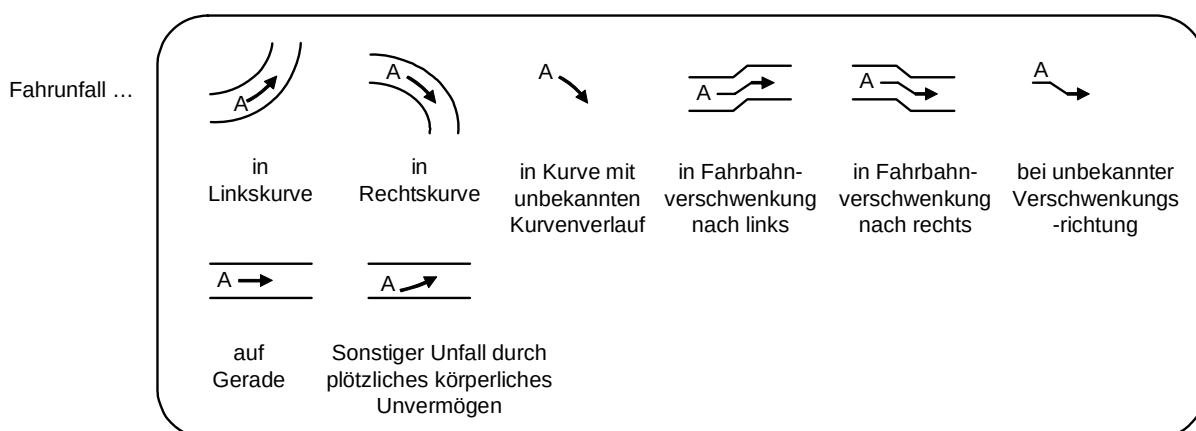


Bild 27: Spurverlassensunfälle

Bild 27 zeigt die Kategorien von Unfalltypen, die Spurverlassensunfälle beinhalten. Der mit diesem Ansatz extrahierte Teil an Unfalldatensätzen wird im Folgenden als Spurverlassensunfälle bezeichnet

3.1.4 Untersuchungsergebnisse

Die eben beschriebenen Unfallgruppen stellten den im Folgenden näher untersuchten Datenpool dar. Diese wurden hinsichtlich zahlreicher Kriterien ausgewertet und mit dem gesamten Unfallgeschehen in Relation gesetzt. Ziel dieser Überlegungen ist das möglichst konkrete Verständnis von Situationen, in denen eine Unterstützung des Fahrers durch einen Querführungsassistenten eine Erhöhung der Verkehrssicherheit zur Folge hat.

3.1.4.1 Generelle Relevanz von Spurwechsel- und Spurverlassensunfällen

Die Spurwechselunfälle nehmen einen Anteil von 1,8% am gesamten in der Unfalldatenbank codierten Unfallgeschehen ein³⁸. Dies entspricht einer Zahl von 332 Spurwechselunfällen bei 18.252 Einzelunfällen. Ihr prozentualer Anteil an den verletzten Personen liegt bei 3,4% (entspricht 1.597 von 46.446 Verletzten). Betrachtet man die spurverlassensrelevanten Unfälle so können 1.157 Unfälle mit 5.289 darin verletzten Personen als Spurverlassensunfälle bezeichnet werden. Dies entspricht einem Anteil von 6,3% an allen Unfällen und 11,4% an allen Verletzten (vgl. Bild 28).

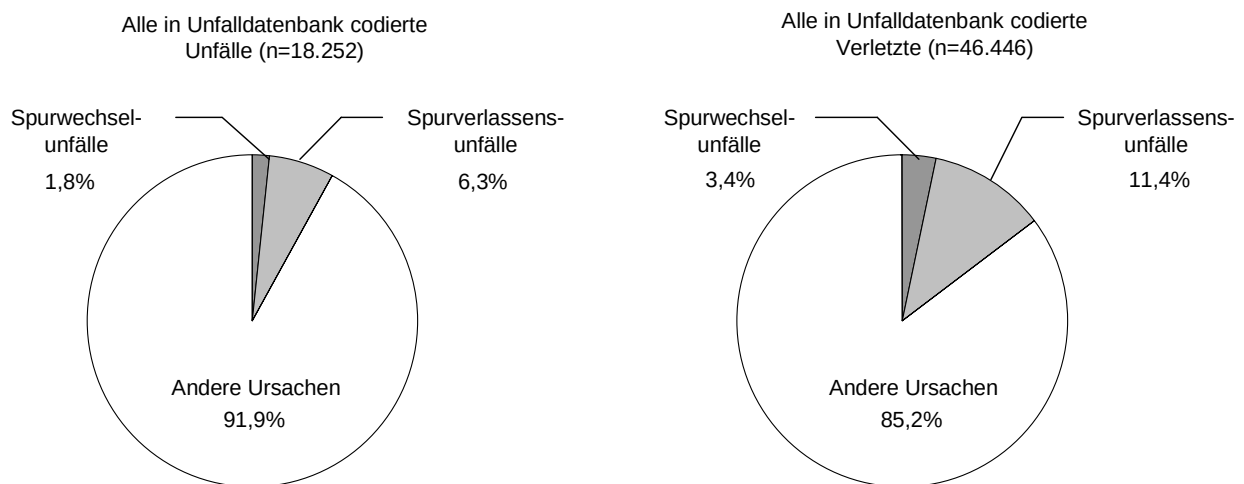


Bild 28: Generelle Relevanz von Spurwechsel- und Spurverlassensunfällen

Zusammengenommen beträgt der Anteil querführungsrelevanter Unfälle am gesamten Unfallpool damit rund 8% und an allen Verletzten rund 15%. Damit kann die Hypothese 3.1-1 gestützt werden und ein deutlicher Anteil von querführungsrelevanten Unfällen am gesamten Unfallgeschehen bestätigt werden. Da sowohl bei Spurwechsel- wie auch bei

³⁸ Untersuchungszeitraum zwischen 1970 und 2003

Spurverlassensunfällen deren Anteil an allen Verletzten höher als deren Anteil an allen Unfällen ist, kann vermutet werden, dass die querführungsrelevanten Unfälle schwerer verlaufen als ein durchschnittliches Unfallereignis. Auf diese Vermutung soll deshalb im nachfolgenden Abschnitt zur Sicherheitspotentialabschätzung näher eingegangen werden.

3.1.4.2 Verteilung nach Straßentyp

Tabelle 6 zeigt den jeweiligen Unfallort aller Unfälle, der Spurwechselunfälle und der Spurverlassensunfälle verteilt auf Bundesautobahnen, Bundesstraßen, Land- und Kreisstraßen und Stadtstraßen. Die Spurwechselunfälle nehmen auf Autobahnen einen Anteil von ca. 7-8% sowohl im Hinblick auf die absolute Unfallzahl als auch auf die darin verletzten Personen ein. Ihr Anteil auf Landstraßen und im Stadtverkehr ist deutlich geringer. Die Wahrscheinlichkeit eines Spurverlassensunfalls ist besonders auf Landes- und Kreisstraßen groß. Bis zu 13,4% aller Unfälle sind dort auf einen Fehler in der Spurhaltung zurückzuführen. Aber auch auf Bundesstraßen und Autobahnen ist das Aufkommen solcher Unfälle mit einem Anteil zwischen 7% und 9% häufig.

Tabelle 6: Untersuchungsergebnis zum Anteil von Spurwechsel- und Spurverlassensunfällen im untersuchten Datenpool

		Alle Unfälle		Spurwechselunfälle		Spurverlassensunfälle	
		Unfälle	Verletzte	Unfälle	Verletzte	Unfälle	Verletzte
Bundesautobahn	Anzahl	1316	4383	91	339	93	199
	Anteil in %			6,91	7,73	7,07	4,54
Bundesstraße	Anzahl	2207	6694	82	263	205	386
	Anteil in %			3,72	3,93	9,29	5,77
Landes- und Kreisstraße	Anzahl	3252	7844	51	156	434	670
	Anteil in %			1,57	1,99	13,35	8,54
Stadtstraße	Anzahl	7949	22234	99	285	336	552
	Anteil in %			1,25	1,28	4,23	2,48

Die im Rahmen dieser Analyse errechneten Anteile von Spurverlassens- und Spurwechselunfällen sind geringer als diejenigen, die beispielsweise in der eingangs dieser Unfallanalyse angeführten Untersuchung des ADAC veröffentlicht wurden. Bei Spurwechselunfällen wird dort von einem Anteil auf Autobahnen von 8,8% gesprochen, während die vorliegende Analyse einen Wert von 6,9% ergibt. Der Unterschied bei der Betrachtung der Spurverlassensunfälle allerdings ist nicht mehr marginal, einem vom ADAC errechneten Wert von 32,4% steht in dieser Arbeit ein Wert von 7,1% gegenüber. Es liegt die Vermutung nahe, dass der Unterschied auf die unterschiedliche Datenbasis und deren unterschiedlichen Detaillierungsgrad zurückzuführen ist. Während die hier verwendete GIDAS-Datenbank eine sehr spezifizierte Abfrage von hochauflösendem Datenmaterial erlaubt, basieren Untersuchungen wie die vom ADAC durchgeführte meist auf den wenig detaillier-

ten Daten der amtlichen Unfallstatistik. Diese erlauben keinen Rückschluss auf die unfallauslösende Situation und sind damit zur belastbaren Quantifizierung des Wirkungsfeldes bestimmter aktiver Sicherheitssysteme sichtbar ungeeignet.

3.1.4.3 Verteilung nach Unfalltypen

Bild 29 zeigt die Verteilung der Spurwechselunfälle hinsichtlich der unfallauslösenden Konstellation.

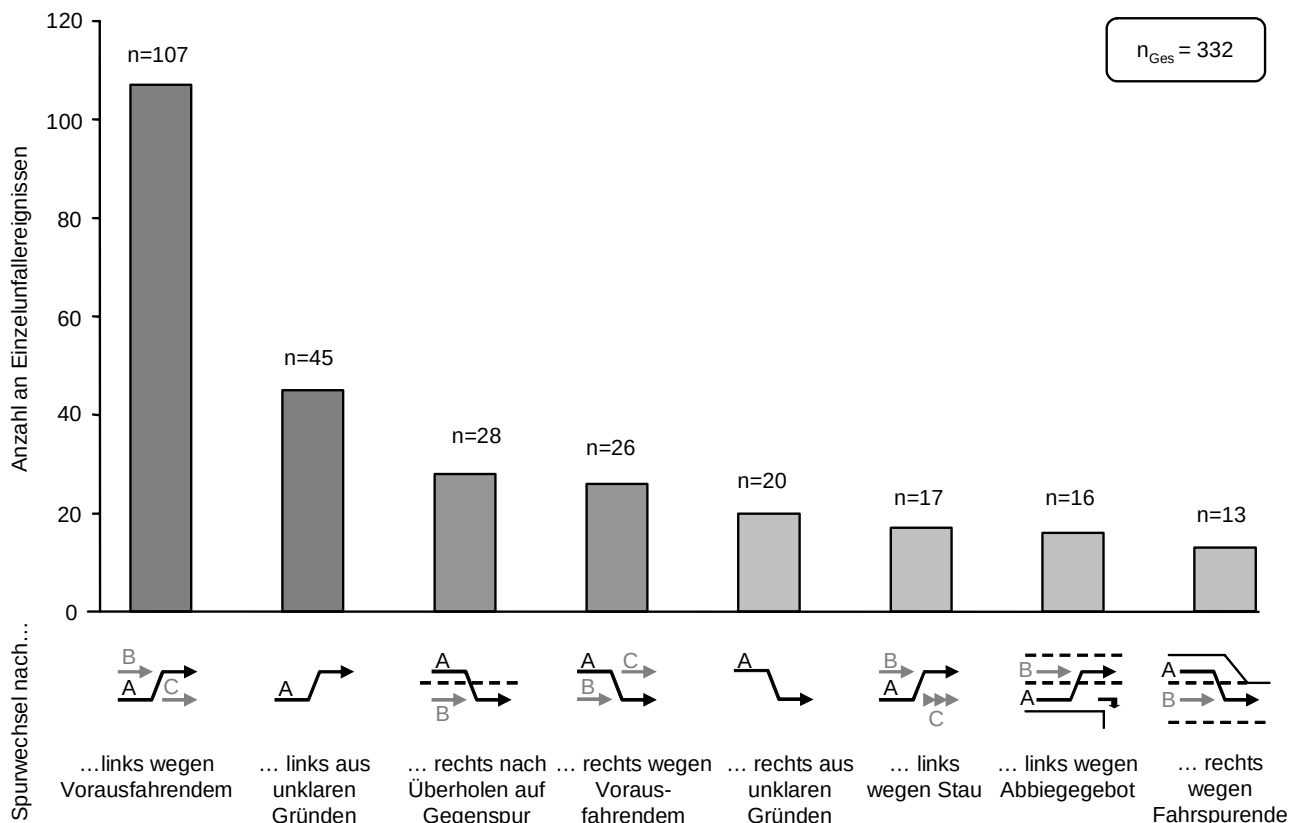


Bild 29: Untersuchungsergebnis zur Verteilung der Spurwechselunfälle

Die weit häufigsten Spurwechselunfälle entstehen demnach dadurch, dass der Fahrer des verursachenden Fahrzeugs auf ein langsameres Vorderfahrzeug aufschließt, die Wunschgeschwindigkeit beibehalten will und deshalb nach links die Spur wechseln will, den Sicherheitsabstand zu einem aufschließenden Fahrzeug auf der Zielspur dabei aber nicht beachtet. Der Anteil dieses Unfalltyps beträgt 32,2%. Neben den Spurwechseln nach links, deren Gründe nach Unfalleintritt nicht mehr nachzuvollziehen waren (13,6%), nehmen auch die Spurwechsel nach rechts nach Überholvorgängen (8,4%) sowie wegen eines langsamer vorfahrenden Fahrzeugs (7,8%) einen hohen Stellenwert ein. Bei der Auslegung des Querführungsassistenten muss diese Verteilung berücksichtigt werden. Für den Spurwechselfall bedeutet dies, dass der nachfolgende Verkehr auf den Nachbarspuren laufend überwacht werden muss, um den Fahrer im Gefahrenfall rechtzeitig zum Ab-

bruch des Spurwechsels bewegen zu können. Die Auslegung muss sowohl nach links wie auch nach rechts erfolgen, da Spurwechselfehler ungefähr in einem Verhältnis von 2/3 (Spurwechsel links) zu 1/3 (Spurwechsel rechts) vorkommen.

Spurverlassensunfälle gehen nach den Ergebnissen der Unfalldatenauswertung in Bild 30 meist auf Fahrurfälle auf geraden Strecken (Anteil=52,8%) und in Kurven zurück (44,3%). Auch die Unfälle durch plötzliches körperliches Unvermögen nehmen in der Gruppe der Spurverlassensunfälle einen hohen Stellenwert ein. Nur noch ein kleiner Teil am gesamten Unfallgeschehen ist auf Fahrfehler in Verschwenkungen zurückzuführen. Festzuhalten bleibt, dass ein System zur Vermeidung des ungewollten Spurverlassens und zur Unterstützung beim Spurhaltevorgang dem Fahrer sowohl auf geraden wie auch bei kurvigem Straßenverlauf zur Verfügung stehen muss.

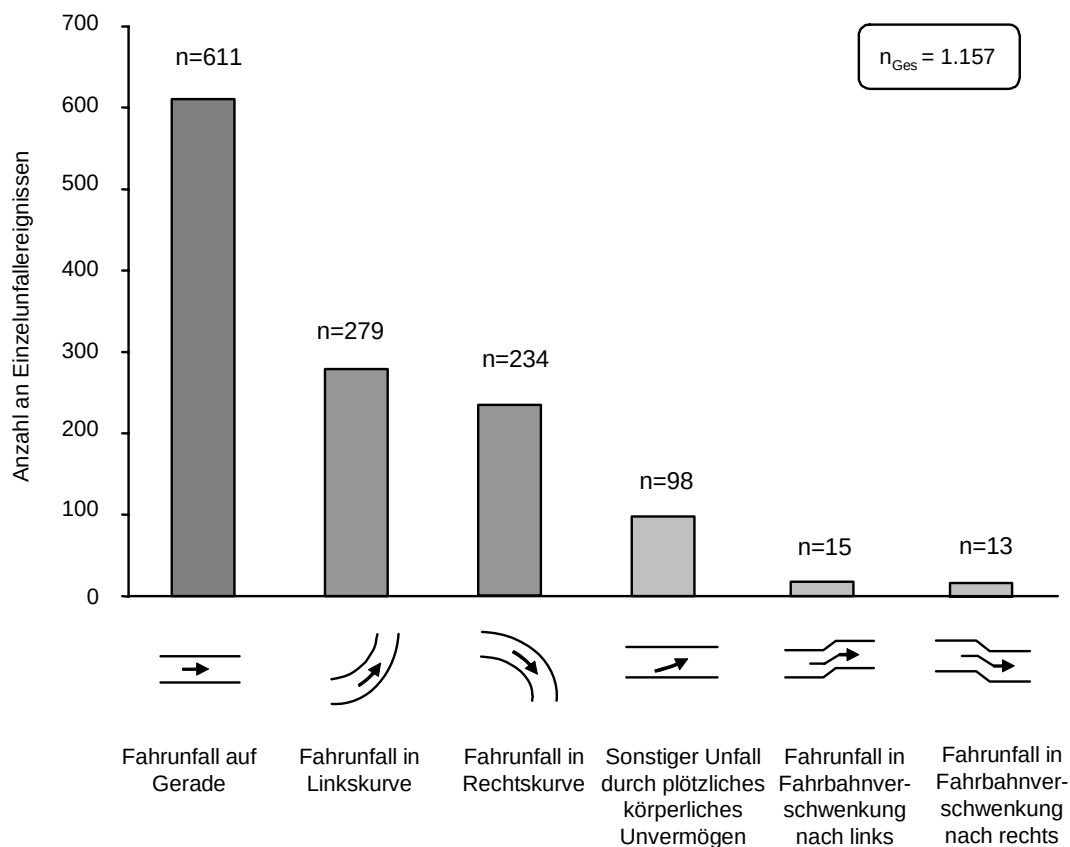


Bild 30: Untersuchungsergebnis zur Verteilung der Spurverlassensunfälle

3.1.4.4 Charakteristische Merkmale

Betrachtet man die Zustände hinsichtlich Tageszeit, Ortslage, Straßenverhältnisse, Straßengestaltung und Baustelleneinfluss zum Zeitpunkt des Unfalleintritts zeigt sich das in Tabelle 7 dargestellte Bild. Das durchschnittliche Unfallereignis findet demnach zu 69% tagsüber, zu 7% in der Dämmerung und zu 23% nachts statt. Dies steht sicher in direktem Zusammenhang mit der Verkehrsleistung, die zu den unterschiedlichen Tageszeiten ge-

leistet wird. Spurwechselunfälle zeigen keine signifikanten Unterschiede zur durchschnittlichen Tageszeitverteilung. Spurverlassensunfälle hingegen zeigen mit einem Anteil von 34% eine deutlich erhöhte Aufkommenswahrscheinlichkeit von Unfällen bei Nacht. Es ist zu vermuten, dass dies auf die Folgen von Müdigkeit und Aufmerksamkeitsdefiziten zurückzuführen ist, von denen Fahrer in der Nacht deutlich stärker beeinflusst werden und die typischerweise zu einem Spurverlassensunfall führen können.

Tabelle 7: Untersuchungsergebnis zur Charakterisierung querführungsrelevanter Unfälle nach Umweltsituation bei Unfalleintritt

		Alle Unfälle	Spurwechselunfälle	Spurverlassensunfälle
<u>Tageszeit</u>				
Untersuchter Unfallpool	Anzahl	18215	332	1155
Tag	Anteil in %	69,29	71,69	56,97
Dämmerung	Anteil in %	7,47	8,73	8,92
Nacht	Anteil in %	23,24	19,58	34,11
<u>Ortslage</u>				
Untersuchter Unfallpool	Anzahl	18251	332	1157
Innerorts	Anteil in %	69,52	47,89	44,68
Außerorts	Anteil in %	30,48	52,11	55,32
<u>Straßenverhältnisse</u>				
Untersuchter Unfallpool	Anzahl	15522	328	1135
trocken	Anteil in %	70,63	73,78	71,54
feucht	Anteil in %	13,33	14,02	13,92
naß	Anteil in %	12,37	11,28	9,96
Schnee	Anteil in %	1,40	0,61	1,94
Rauhreif/Eis	Anteil in %	2,17	0,30	2,56
andere	Anteil in %	0,10	0,00	0,09
<u>Straßengestaltung</u>				
Untersuchter Unfallpool	Anzahl	18140	331	1151
Gerade Strecke	Anteil in %	40,80	72,21	52,30
Kurve	Anteil in %	10,45	4,53	39,27
Kreuzung	Anteil in %	25,82	9,97	3,65
Einmündung	Anteil in %	17,02	10,27	2,43
Kreisel	Anteil in %	0,76	1,21	0,35
<u>Baustelleneinfluss</u>				
Untersuchter Unfallpool	Anzahl	18251	332	1157
Unfälle mit Baustelleneinfluss	Anteil in %	1,79	4,52	2,33

Man sieht außerdem, dass die querführungsrelevanten Unfälle vorrangig den außerörtlichen Verkehr betreffen. Spurwechselunfälle treten zu über 50%, Spurverlassensunfälle zu über 60% auf außerörtlichen Straßen ein, während das gesamte Unfallgeschehen sich im Gegensatz zu knapp 70% innerorts vollzieht. Der Querführungsassistent muss demnach

besonders für die Situationen auf Autobahnen und Landstraßen ausgelegt werden, die Funktionalität muss damit auch bis in hohe Geschwindigkeitsbereiche sichergestellt sein. Eine Auslegung speziell auf Stadtstraßen scheint nicht notwendig, auch vor dem Hintergrund, dass dort die Unfälle im Regelfall weniger negative Folgen für die Beteiligten haben.

Die Betrachtung der Straßenbedingungen zum Unfallzeitpunkt zeigt, dass etwa 30% des gesamten Unfallgeschehens und etwa 25% der querführungsrelevanten Unfälle auf Straßen stattfinden, die feucht, nass oder mit Raureif, Eis oder Schnee bedeckt sind. Damit wird deutlich, dass aktive Sicherheitssysteme nicht nur auf trockener Straße, sondern auch auf nasser und feuchter Straße bereitstehen sollten. Der Anteil von Unfällen bei Schnee und Eis ist bei Spurwechselunfällen mit rund 1% vernachlässigbar gering, bei Spurverlassensunfällen mit 4,5% kann er als niedrig angenommen werden. Eine Systemauslegung speziell auf diese Situationen muss damit nicht zwingend erfolgen, besonders da in diesen Situationen die aktuell am Markt verfügbare Sensortechnologie an ihre Grenzen stößt (z.B. Erkennung der Fahrbahn bei vorhandener Schneedecke).

Spurwechselunfälle finden vorwiegend auf gerader Strecke statt, daneben führen Spurwechselfehler zu 5% in Kurven, zu 10% in Einmündungen und zu 10% in Kreuzungen zu Unfällen. Das Aufkommen von Spurverlassensunfällen ist mit 60% auf gerade Strecken und mit 31% auf Kurven verteilt. Die Analyse zeigt weiterhin, dass etwa 4,5% aller Spurwechselunfälle nachweisbar innerhalb einer Baustelle stattfinden oder der Einfluss einer Baustelle am Unfallereignis beteiligt ist. Die Wahrscheinlichkeit von Spurwechselunfällen unter Baustelleneinfluss ist damit 2,5-mal so hoch wie bei einem durchschnittlichen Unfallereignis. Eine Unterstützung bei der Spurwechseldurchführung durch ein Assistenzsystem sollte somit auch in Baustellen erfolgen. Bei den Spurverlassensunfällen sind es 2,2%, der Baustelleneinfluss führt hier demnach nicht zu einer signifikant erhöhten Unfalleintrittswahrscheinlichkeit.

3.1.4.5 Charakterisierung der verursachenden PKW-Fahrer

Das gesamte in der Datenbank hinterlegte Unfallgeschehen geht mit einem Anteil von 30% zu Lasten weiblicher Autofahrer, männliche Fahrzeugführer verursachen 70% aller Unfälle. Dieser Effekt kann die Folge einer generell sichereren Fahrzeugbeherrschung durch Frauen sein, kann aber auch auf ein geschlechterabhängiges Fahrleistungsaufkommen zurückzuführen sein. Spurverlassens- wie Spurwechselunfälle zeigen eine Verlagerung hin zu Fahrern männlichen Geschlechts, nur noch 22,1% aller Spurwechselunfälle und 21,8% aller Spurverlassensunfälle werden durch weibliche Fahrer verursacht.

Die Tabelle 8 zeigt die Altersstruktur der in dieser Arbeit relevanten Unfalltypen. Betrachtet wurde in diesem Fall das Alter des unfallauslösenden Fahrzeugführers, der einen Spurverlassens- oder Spurwechselunfall mit seinem PKW verursacht hat. Besonders die Spurverlassensunfälle sind in der Gruppe der jungen Fahrer (18-24 Jahre) deutlich überrepräsen-

tiert. Spurwechselunfälle unterscheiden sich hinsichtlich der Altersverteilung von der Gesamtunfallsituation nur wenig.

Tabelle 8: Untersuchungsergebnis zur Altersverteilung aller Unfälle und von Spurwechsel- und Spurverlassensunfällen

	Alle Unfälle	Spurwechselunfälle	Spurverlassenunfälle
<u>Alter des verursachenden PKW-Fahrers</u>			
Untersuchter Unfallpool	Anzahl 8230	144	666
18-24	Anteil in % 25,20	24,31	34,98
25-30	Anteil in % 16,22	18,06	17,42
31-40	Anteil in % 20,94	25,69	17,27
41-50	Anteil in % 14,37	12,50	14,56
51-60	Anteil in % 11,66	10,42	8,11
61-70	Anteil in % 6,25	4,86	3,30
über 70	Anteil in % 5,36	4,17	4,35

3.1.5 Sicherheitspotentialabschätzung

Das *Sicherheitspotential* eines Assistenzsystems kann als das Produkt aus *Wirkungsfeld* und *Wirkungsgrad* quantifiziert werden. Das Wirkungsfeld entspricht dabei der Gesamtheit aller Unfälle, bei denen das System gemäß seiner Spezifikation aktiv sein kann. Da aber ein Assistenzsystem aufgrund seiner Systemgrenzen nicht immer eingreifen kann, oder nicht alle Unfallsituationen, in denen es zum Einsatz kommt, tatsächlich auch verhindern oder in ihrer Schwere mildern wird, ist der zu erwartende Sicherheitsnutzen im Allgemeinen geringer als sein Wirkungsfeld. Der Faktor Wirkungsgrad gibt deshalb ein Maß dafür an, wie groß der tatsächliche Nutzen des Systems in Unfallsituationen ist. Der Wirkungsgrad wird in der Realität immer kleiner 1 sein, sogar negative Werte sind bei schlechter Systemausprägung denkbar.

3.1.5.1 Verletzungsrisikobetrachtung

Die Auswertung der Unfalldatenbank zeigt, welches Risiko die bei einem Unfall beteiligten Personen haben, durch den Unfall ihr Leben zu verlieren. Als Randbedingung gilt, dass im vorliegenden Fall nur Unfälle betrachtet werden, die ohnehin schon zu mindestens einem Verletzten geführt haben und aus diesem Grund in der Unfalldatenbank codiert sind. Die nachfolgend besprochenen Todesraten sind deshalb bereits auf eine Negativauswahl bezogen. Das allgemeine Mortalitätsrisiko, durch einen Verkehrsunfall sein Leben zu verlieren, kann aus der Datenbank nicht erarbeitet werden, da die Übergangswahrscheinlichkeiten von normaler, unkritischer Fahrt zu einem Unfallereignis nicht bekannt sind.

Bild 31 zeigt für verschiedene Unfallgruppen und verschiedene Ortslagen und Straßentypen den Anteil an Personen, die bei den jeweiligen Verkehrsunfällen verstorben sind. Der

Anteil verstorbener Personen liegt im gesamten Unfalldatenpool bei 1,7%. Die Todesrate ist mit 3,7% außerorts mehr als zweimal so groß wie dieser Durchschnitt. Die Unfälle, die auf einen Fehler beim Spurwechsel zurückzuführen sind, zeigen verglichen mit dem gesamten Unfallgeschehen ein niedrigeres Risiko. Die Unfälle, die auf ein Verlassen der Fahrspur zurückgehen, führen außerorts knapp 2-mal häufiger zu Todesopfern als die durchschnittlichen Unfallereignisse.

Anteil der getöteten Personen an Unfallbeteiligten [%]

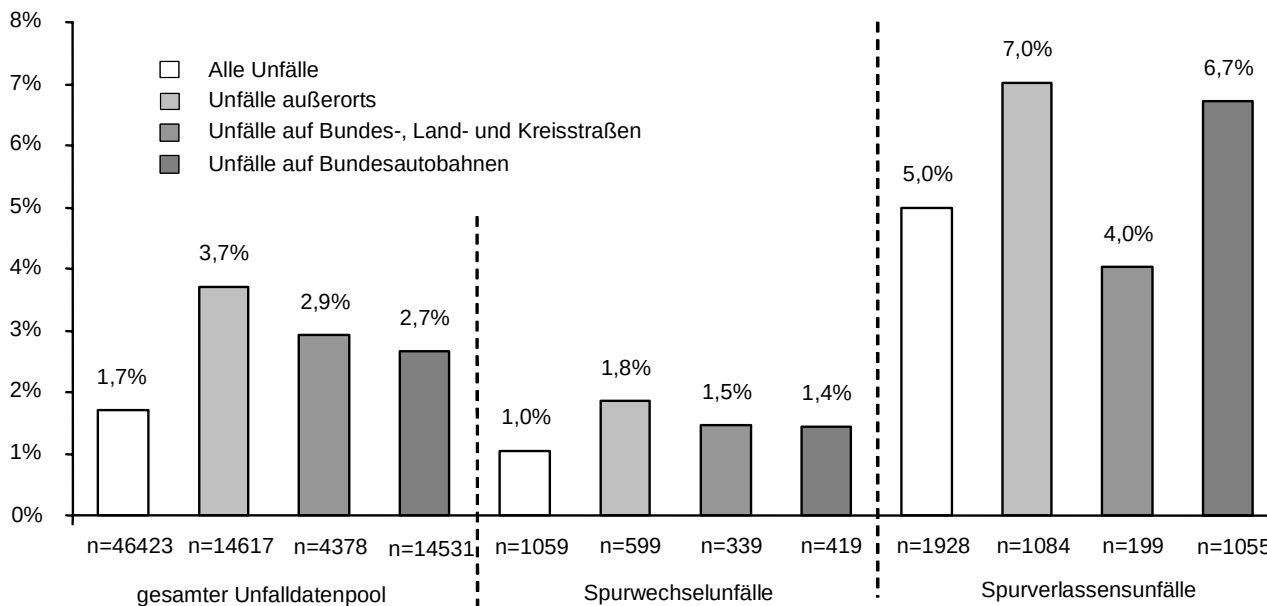


Bild 31: Untersuchungsergebnis zur Todesrate von Spurwechsel- und Spurverlassensunfällen

Detailliert man diese Risikobetrachtung hinsichtlich verschiedener Unfalltypen, so zeigt sich, dass sowohl die nach Bild 29 und Bild 30 häufig auftretenden Spurwechselunfälle und Spurverlassensunfälle deutlich schwerere Folgen haben als der durchschnittliche Unfalldatenpool. Die Wahrscheinlichkeit beispielsweise bei einem Fahr Unfall auf der Geraden sein Leben zu verlieren, beträgt 6,3%, bei Unfällen, die auf plötzliches körperliches Unwohlsein zurückzuführen sind, sogar 13,8%. Auch der in der Gruppe der Spurwechselunfälle häufige Spurwechsel nach links wegen eines langsam vorausfahrenden Fahrzeugs weist ein erhöhtes Sterberisiko auf (vgl. Bild 32).

Ergänzend wurde die Verletzungsschwereverteilung der verschiedenen Unfallgruppen hinsichtlich der Straßentypen betrachtet. Die Auswertung ergibt, dass die Unfallfolgen bei Unfällen auf Bundes-, Land- und Kreisstraßen schwerer sind, als bei Unfällen auf Stadtstraßen und Autobahnen. Der Anteil unverletzter Personen ist bei Stadtstraßen und Autobahnen annähernd gleich. Erst die Betrachtung schwererer Verletzungsgrade (MAIS 4 und größer) verschiebt das Verhältnis zu Ungunsten der Autobahnunfälle.

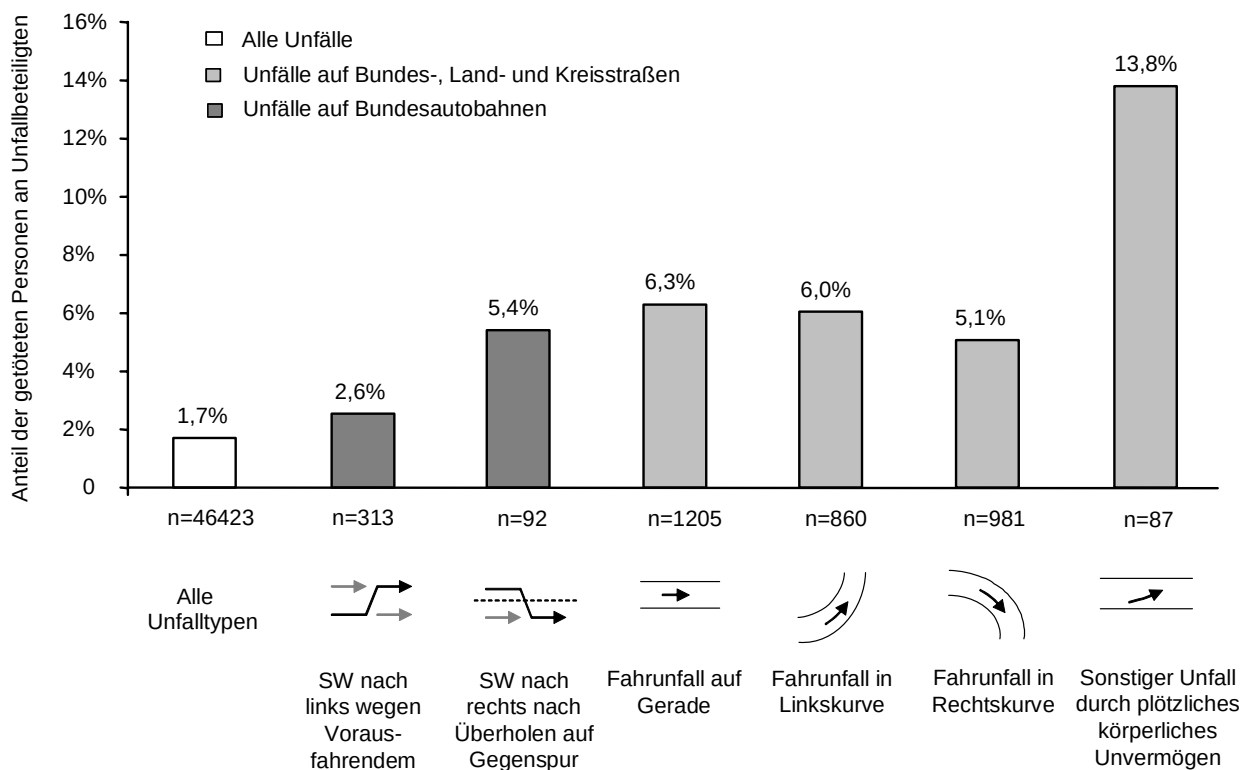


Bild 32: Untersuchungsergebnis zur Todesrate ausgesuchter Unfalltypen bei Unfällen mit verletzten Personen

3.1.5.2 Hochrechnung auf bundesdeutsche Verhältnisse

Da die Verteilung der verschiedenen in der GIDAS-Datenbank codierten Unfälle nach STANZEL repräsentativ für die Unfallsituation auf dem gesamten bundesdeutschen Gebiet ist [116], kann die Anzahl von Personen berechnet werden, die in Deutschland bei Spurwechsel- und Spurverlassensunfällen mit verschiedenen Verletzungsschweregraden beteiligt sind. Dazu können je nach Stand der zur Auswertung herangezogenen Datenbank Hochrechnungsfaktoren für die einzelnen Verletzungsschweregrade multipliziert werden. Die Tabelle 9 zeigt die durchgeführte Hochrechnung. Anhand der Unfallschwereverteilung bei den hier betrachteten querführungsrelevanten Unfällen kann eine Einschätzung über die Gesamtzahl an Verletzten getroffen werden, die auf bundesdeutscher Ebene in Spurwechsel- und Spurverlassensunfällen beteiligt sind.

Demnach werden im Bundesgebiet jährlich bei Spurwechselunfällen knapp 8.700 Personen innerorts und 11.400 außerorts verletzt (MAIS 1 und schwerer). 13.106 Personen bleiben innerorts, 15.865 außerorts unverletzt. Bei Spurverlassensunfällen ergeben sich zusammengekommen rund 26.000 innerorts und 32.200 außerorts verletzte Unfallbeteiligte. Betrachtet man nur die massiv verletzten Personen, die einen MAIS⁵ von 4 und größer erleiden, so ergibt sich mit ungefähr 300 verletzten Personen bei Spurwechselunfällen und 2.000 Verletzten bei Spurverlassensunfällen ein bemerkenswertes Wirkungsfeld an Unfäl-

len, die außerorts geschehen. Um das Ziel, schwere Verletzungen zu vermeiden und die Zahl von Unfalltoten zu reduzieren, zu erreichen, muss der Querführungsassistent speziell auf die Situationen ausgelegt werden, die außerorts auf Autobahnen, Land- und Bundesstraßen auftreten.

Tabelle 9: Hochrechnung der GIDAS-Daten auf die bundesdeutsche Situation

Anzahl der Verletzten mit maximalen Verletzungsgrad von...							
	MAIS 0	MAIS 1	MAIS 2	MAIS 3	MAIS 4	MAIS 5	MAIS 6
<u>Verletzungsschwere in Datenbank</u>							
Spurwechselunfälle innerorts (n=461)	266	156	27	2	2	2	0
Spurwechselunfälle außerorts (n=599)	322	184	51	17	4	7	4
Spurverlassensunfälle innerorts (n=845)	191	399	141	52	16	8	8
Spurverlassensunfälle außerorts (n=1084)	184	429	212	93	38	27	38
<u>Hochrechnungsfaktoren</u>							
	49,27	49,27	31,1	25,98	23,78	19,83	17,12
<u>Hochrechnung auf Gesamtdeutschland</u>							
Spurwechselunfälle innerorts	13106	7686	840	52	48	40	
Spurwechselunfälle außerorts	15865	9066	1586	442	95	139	68
Spurverlassensunfälle innerorts	9411	19659	4385	1351	380	159	137
Spurverlassensunfälle außerorts	9066	21137	6593	2416	904	535	651

Mit diesem Ansatz zur Prognose des Sicherheitsgewinns gelangt man recht schnell und mit vertretbarem Aufwand zu Ergebnissen. Das Wirkungsfeld anzugeben, ist unproblematisch, kann es doch wie im vorliegenden Fall hinreichend genau aus den Unfalldatenbanken ausgelesen werden. Der Ansatz macht aber auch eine genaue Einschätzung des Wirkungsgrades notwendig. Zwar existieren beispielsweise durch Versuche im Fahrsimulator, Expertenbefragungen und der Einführung verschiedener unfallsituationsabhängiger Wirkungsgrade verschiedene Möglichkeiten, die Validität der Variable Wirkungsgrad zu erhöhen. Auch über die detaillierte Betrachtung der Einzelunfalldaten kann wenigstens retrospektiv eine Einschätzung über den Wirkungsgrad in den betrachteten Einzelereignissen getroffen werden. Eine belastbare wissenschaftliche Bestimmung eines generellen Wirkungsgrades für ein Fahrerassistenzsystem bleibt in frühen Phasen der Systementwicklung mit vertretbarem Aufwand unerreichbar.

3.1.6 Diskussion

Die Ergebnisse der Datenbankauswertung stützen sowohl die Hypothese 3.1-1 als auch die Hypothese 3.1-2. Unfälle in der Querführung nehmen einen deutlichen Anteil am ge-

samen Unfallgeschehen ein. Alle Unfälle betrachtet, beträgt der Anteil querführungsrelevanter Unfälle 8%, an allen Verletzten sogar 15%. Spurverlassens- wie Spurwechselunfälle zeichnen dabei eine bestimmte Charakteristik aus. Spurwechselunfälle sind auf Autobahnen am häufigsten. Ihr Anteil an allen Autobahnunfällen beträgt 6,9%. Besonders häufig ist eine unfallauslösende Konstellation, bei der ein Fahrzeug aufgrund eines vorausfahrenden Fahrers die Spur nach links wechselt und dort mit dem Auffahrenden kollidiert. Der Anteil beträgt 32,2% an allen Spurwechselunfällen. Spurwechselunfälle zeigen keine untypischen Verschiebungen, die auf die Wetterlage, die Tageszeit oder das Alter des Fahrers zurückzuführen sind. Sie treten allerdings im Vergleich zum gesamten Unfalldatenpool 2,5-mal so oft in Baustellen auf. Das Verletzungsrisiko ist im Mittel geringer als das durchschnittliche Unfallereignis. Die besonders häufige, oben skizzierte, unfallauslösende Situation hingegen, verläuft überdurchschnittlich verletzungsreich. Bei der Auslegung des Querführungsassistenten müssen diese Sachverhalte berücksichtigt werden. Das System muss speziell auf Autobahnen bei Spurwechselsituationen auf die linke Nachbarspur über genügend Sensorreichweite und eine adäquate Risikoberechnung verfügen, um dem Fahrer eine drohende Gefahr anzuzeigen. Eine symmetrische Auslegung des Systems ist notwendig, auch Spurwechselsituationen nach rechts besonders nach Überholmanövern führen häufig zu Unfällen. Der Fahrer muss hier in jenen Situationen unterstützt werden, in denen er beispielsweise den Abstand zum Überholten beim Wiedereinscheren falsch einschätzt.

Spurverlassensunfälle sind statistisch betrachtet besonders auf Land- und Kreisstraßen wahrscheinlich. Es ergeben sich dort Anteile am gesamten Unfallgeschehen von bis zu 13,4%. Den häufigsten Unfalltyp stellt dabei eindeutig der Fahrnfall auf einer geraden Strecke dar. Das Sterberisiko bei Spurverlassensunfällen ist im Vergleich zum restlichen Unfalldatenpool deutlich größer. Der Anteil von getöteten Personen an allen Unfallbeteiligten kann je nach Straßentyp und Unfalltyp bis zu 14% betragen. Spurverlassensunfälle zeigen zudem eine Verschiebung zu nächtlichen Unfallzeitpunkten und werden häufiger als andere Unfälle von jungen Fahrern zwischen 18 und 24 Jahren verursacht. Die Sensoren des Querführungsassistenten müssen damit einen Betrieb des Systems sowohl bei Tag wie auch bei Nacht sicherstellen. Da etwa 25% aller querführungsrelevanten Unfälle auf feuchten und nassen Straßen geschehen, muss auch die Beherrschung widriger Straßenverhältnisse seinen Platz im Lastenheft eines Querführungsassistenten finden. Problematisch hingegen ist es, die geschilderte Risikogruppe junger Fahrer mit dem System zu adressieren. Neuartige Technologien werden meist ausgehend von den teuren Baureihen „von oben“ in die Produktpalette eingeführt. Bis diese dann Fahrzeuggruppen erreichen, die von einem Großteil der jungen Fahrer erschwinglich sind (z.B. kleinere Baureihen, Gebrauchtwagen) vergehen oft einige Jahre. Trotzdem wäre aufgrund der Untersuchungsergebnisse eine schnelle Verfügbarkeit z.B. durch eine angemessene Preisgestaltung bzw. unkonventionelle Produkteinführungsstrategie des Systems für junge Fahrer sinnvoll.

Trotz aller Sorgfalt unterliegt die statistische Auswertung von Unfalldaten zahlreichen Beschränkungen, was ihre Aussagekraft und ihre Repräsentativität hinsichtlich des realen Unfallgeschehens angeht. Untersuchungen zur Fahrzeugsicherheit befassten sich bisher fast ausschließlich mit passiven Systemen. Dabei stellt sich die Frage, wie gut solche passive Maßnahmen im Falle des Unfalleintritts den Fahrer und die Beteiligten vor den Unfallfolgen schützen können. Aktive Systeme hingegen haben zum Ziel, den Unfall, wenn möglich, ganz zu vermeiden. Damit wird eine komplett neue Fragestellung relevant. Es gilt nun zu klären, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Fahrer in einen Unfall (evtl. bestimmten Typs) verwickelt wird oder bzw. selbst einen solchen verursachen wird. Das Interesse bei der Unfalldatenbetrachtung verschiebt sich so von Variablen zur Unfallfolge hin zu Variablen, die Unfallgründe bzw. den Unfallhergang codieren. Alle Unfalldatenbanken beziehen sich ausschließlich auf Situationen, in denen das Unfallereignis bereits eingetreten ist, sie stellen ausschließlich die Negativauswahl des Verkehrsgeschehens dar. Situationen hingegen, in denen es trotz Fehlverhalten nicht zum Unfall kam, werden nicht codiert. Es muss aufgrund oben angeführter Gründe beachtet werden, dass eine detaillierte Betrachtung menschlichen Verhaltens in bestimmten Situationen zur Bewertung aktiver Sicherheitssysteme daher auf Basis von Unfalldatenbanken manchmal nur eingeschränkt möglich ist.

3.2 Multimediale Kundenbefragung

Die Analyse von Kundenwünschen muss nach den Ausführungen im Kapitel Zielsetzung Teil der Situationsanalyse sein. Das Erfragen der Kundenpräferenz bei Systemen der Fahrerassistenz in frühen Phasen der Produktentwicklung gestaltet sich allerdings aus zahlreichen Gründen als herausfordernd. Den befragten Kundengruppen fehlt es bei solchen neuartigen Technologien an Erfahrung mit ähnlichen Systemen, was deshalb ein Ableiten und einen Vergleich mit bisher Bekanntem nicht möglich macht. Zudem steht in den frühen Phasen der Entwicklung noch kein Versuchsträger zur Verfügung, anhand dessen beispielsweise im Rahmen eines Fahrversuches eine Bewertung erfolgen könnte. Aus diesem Grund wurde zusammen mit dem TÜV Rheinland ein Vorgehen entwickelt, welches trotz der Randbedingungen der frühen Produktentstehungsphase eine aussagekräftige Kundenbefragung ermöglicht. Die Ergebnisse können direkt in die Entwicklung des Systems eingespeist und bei der benutzerorientierten Umsetzung der Systemfunktionalität berücksichtigt werden.

3.2.1 Befragungsziel

Im Rahmen einer rechnergestützten Befragung soll die Kundenpräferenz zu Merkmalen des in dieser Arbeit thematisierten Querführungsassistenten erfragt werden. Den Befragten muss klar sein, welche konkreten Systemumfänge der Querführungsassistent umfasst. Sie müssen sich ein möglichst konkretes Bild von der durch das Assistenzsystem gebotenen Funktion machen können. Daher soll den Befragten zu Beginn der Befragung eine

Beschreibung des Querführungsassistenten dargeboten werden, dessen konkreter Funktionsumfang sich aus den bisherigen Ausführungen ableiten lässt. Besonders bei der Beschreibung der Mensch-Maschine-Schnittstelle müssen Annahmen getroffen werden, die erst später im Rahmen von weiteren Untersuchungen überprüft werden können, zum augenblicklichen Zeitpunkt allerdings die Verständlichkeit erhöhen. Der Querführungsassistent wird den Befragten als Assistenzsystem vorgestellt, das laufend die Nachbarspuren auf Fremdfahrzeuge detektiert und im Spurwechselfall den Fahrer über ein optisches Signal im Außenspiegel warnt, sobald dieser den Blinker betätigt und sich ein Fahrzeug auf der Zielspur befindet. Übertritt der Fahrer die Spurmarkierungen ohne den Blinker zu setzen, wird von einem unbeabsichtigten Spurverlassen ausgegangen. Es erfolgt eine haptische Warnung am Lenkrad, um den Fahrer zu einer korrigierenden Lenkreaktion zu veranlassen. Simulationen, die den Befragten präsentiert werden, sollen das Erklärte verdeutlichen. Die Multimediabefragung dient nun dazu, die gewünschte Systemausgestaltung zu ermitteln und -falls vorhanden- den Unterschied zwischen der vorgestellten Systemspezifikationen und der Vorstellung des Kunden vom System zu identifizieren (siehe Bild 33).

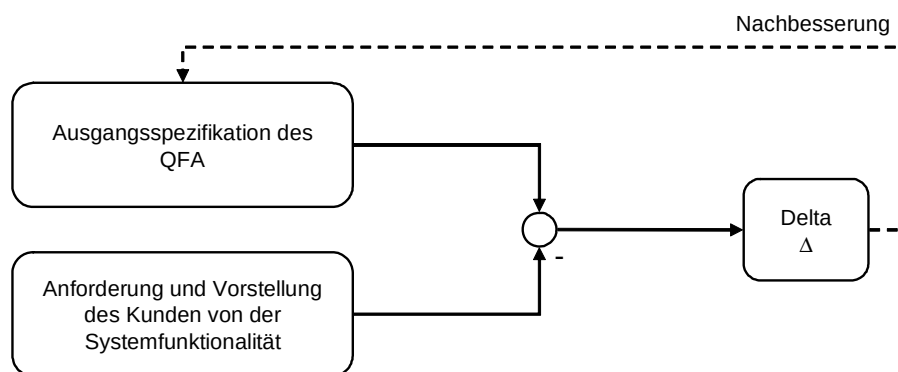


Bild 33: Kundenbefragung als Mittel zur Nachbesserung der Systemspezifikation

3.2.2 Befragungsmethodik

Die Befragung erfolgte im Rahmen einer Multimediabefragung, die der Autor der vorliegenden Arbeit in Zusammenarbeit mit dem TÜV Rheinland durchführte. Die Probanden wurden vom TÜV eingeladen und in einer rechnergestützten Befragung an einem eigens dafür präparierten Rechnerarbeitsplatz multimedial befragt. Die Befragung wurde in mehrere Blöcke unterteilt. Nach einer allgemeinen Einführung in die Bedienung des Rechners und der Befragungsmaske wurden die Probanden mit Hilfe einer Beschreibung und mehrerer Simulationen über die Grundfunktionalität des Querführungsassistenten informiert. Dazu entwickelte der Autor in Zusammenarbeit mit den beteiligten Personen des TÜV Rheinlands Ansätze, um auch unerfahrenen Probanden ohne Veranschaulichung durch einen Versuchsträger oder ähnliche Exponate die komplexe Funktionalität des Querführungsassistenten verständlich machen zu können. Die Veranschaulichung der Systemfunktion erfolgte mit Hilfe von Simulationen. Mit diesem Wissen sollten die Versuchspersonen dann in Fragekomplexen zu Aktivierung und Deaktivierung, Systemfunktionalität,

Mensch-Maschine-Schnittstelle und Kaufbereitschaft ihre Präferenzwahl zum Querführungsassistenten treffen. Die Tabelle 10 zeigt diese Themenkomplexe und die konkreten Fragestellungen.

Tabelle 10: Themenkomplexe und konkrete Fragestellungen zur Klärung im Rahmen der Multimediabefragung

Themenkomplex	Konkrete Fragestellung
Aktivierung und Deaktivierung	- Auf welchen Straßen soll der QFA funktionieren? - Ab welcher und bis zu welcher Geschwindigkeit soll der QFA funktionieren? - Wie soll sich der QFA aktivieren?
Systemfunktionalität	- Soll die Systemunterstützung im Spurwechselfall von der Blinkerbetätigung abhängig sein ?
Fahrer-Fahrzeug-Schnittstelle	- Soll die Warnstufe um eine Informationsstufe ergänzt werden? - Sollen die Warnungen des Systems so unauffällig sein, dass eventuelle Beifahrer von den Systemreaktionen nichts mitbekommen können?
Kaufbereitschaft	- Welche Faktoren spielen beim Kauf des QFA eine Rolle? - Welche Preisbereitschaft erzielt der QFA?

Während der gesamten Befragung war ein Versuchsleiter anwesend, der die Probanden bei Fragen sowohl zur Rechnerbedienung als auch zur Systemfunktionalität unterstützte. Die Hypothese, die im Rahmen Befragung überprüft werden soll, ergibt sich zu:

Hypothese 3.2-1: Bereits im Rahmen einer Multimediabefragung ergibt sich eine eindeutige Kundenpräferenz bezüglich charakteristischer Merkmale hinsichtlich Aktivierung & Deaktivierung, Systemfunktionalität, Fahrer-Fahrzeug-Schnittstelle und Kaufbereitschaft des Querführungsassistenten.

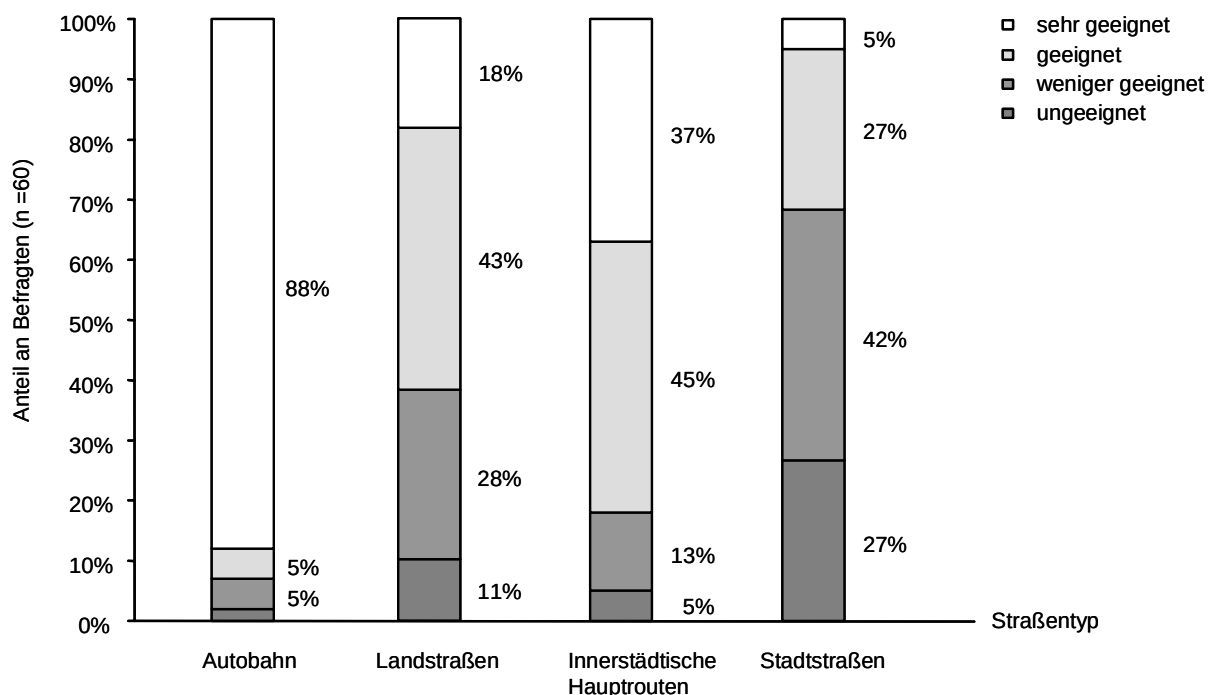
3.2.3 Befragungsstichprobe

Die Versuchspersonen wurden nach verschiedenen Kriterien ausgewählt. Als Voraussetzung galt, dass alle Befragten aktuell ein Fahrzeug der Oberklasse oder der gehobenen Mittelklasse fahren und überwiegend als Vielfahrer eingestuft werden konnten. An der Befragung nahmen schließlich 60 Personen teil (15 weiblich, 45 männlich). Eine demographische Betrachtung des Probandenpools zeigt, dass 10% der Befragten zwischen 25 und 35 Jahre, 28% zwischen 36 und 45 Jahre, 18% zwischen 46 und 55 Jahre, 26% zwischen 56 sowie 17% älter als 65 Jahre alt waren. 69% konnte eine Jahresfahrleistung von mehr als 20.000 km aufweisen. Die Stichprobe kann als durchschnittlich technikaffin und technikfahren eingestuft werden.

3.2.4 Befragungsergebnisse

3.2.4.1 Aktivierung und Deaktivierung des Systems

Bild 34 zeigt die Antworten der Befragten danach, für wie geeignet sie den Querführungsassistenten auf verschiedenen Straßentypen (Autobahn, Landstraße, innerstädtische Hauptroute, Stadtstraßen) halten. Die befragten Personen sehen gerade auf Autobahnen, auf innerstädtischen Haupttrouten sowie auf Landstraßen einen Bereich, in dem sie eine Unterstützung bei Spurhaltung und Spurwechsel als sinnvoll erachten. Auf Stadtstraßen halten den Querführungsassistenten 69% der 60 Versuchspersonen für weniger oder gar nicht geeignet.



*Bild 34: Befragungsergebnisse zur Kundenpräferenz in Bezug auf den Unterstützungsbe-
reich des Querführungsassistenten*

Das Fahren auf Autobahnen wird meist als besonders risikoreich empfunden, obwohl die Unfallzahlen zeigen, dass auf Basis der erfahrenen Kilometerleistung die Autobahn den sichersten Straßentyp darstellt. Gefühls Risikoempfinden unterscheidet sich damit einmal mehr vom tatsächlich vorhandenen Risiko. Aus diesem Gefühl heraus sind die Befragten vermutlich bereit, den Querführungsassistenten als Unterstützung auf Autobahnen zuzulassen, das System im Stadtverkehr allerdings für weniger geeignet einzustufen. Interessant ist die Tatsache, dass den Befragten innerstädtische Haupttrouten für die Systemunterstützung geeigneter als Landstraßen erscheinen. Fehler beim Spurwechsel werden von menschlichen Fahrern häufiger als Spurverlassensfehler erfahren (siehe dazu Kapitel 7.6.1), sie sind damit ein präsenteres Ereignis. Bei der Beurteilung der Systemfunktionalität hat damit vermutlich die vom System angebotene Unterstützung im Spurwechselfall

einen stärkeren Einfluss als die Verhinderung des ungewollten Spurverlassens. Da Spurwechselfehler auf Landstraßen nur beim Wiedereinscheren nach Überholende auftreten, auf mehrspurigen innerstädtischen Hauptrouten allerdings Spurwechselmanöver häufiger sind, ist zu vermuten, dass deshalb dort das System auch für geeigneter eingestuft wird.

Diese Ergebnisse korrelieren in sehr starkem Maße mit der anschließenden Frage nach dem Geschwindigkeitsbereich, in dem das System unterstützend tätig sein soll. Die Probanden wurden gebeten, Werte für zwei Geschwindigkeitsschwellen anzugeben. Die untere Geschwindigkeitsschwelle gibt die Geschwindigkeit an, ab der das System funktionieren soll. Die obere Geschwindigkeitsschwelle stellt die Grenze dar, ab der das System nicht mehr unterstützend tätig sein muss. Die Ergebnisse zeigt Bild 35.

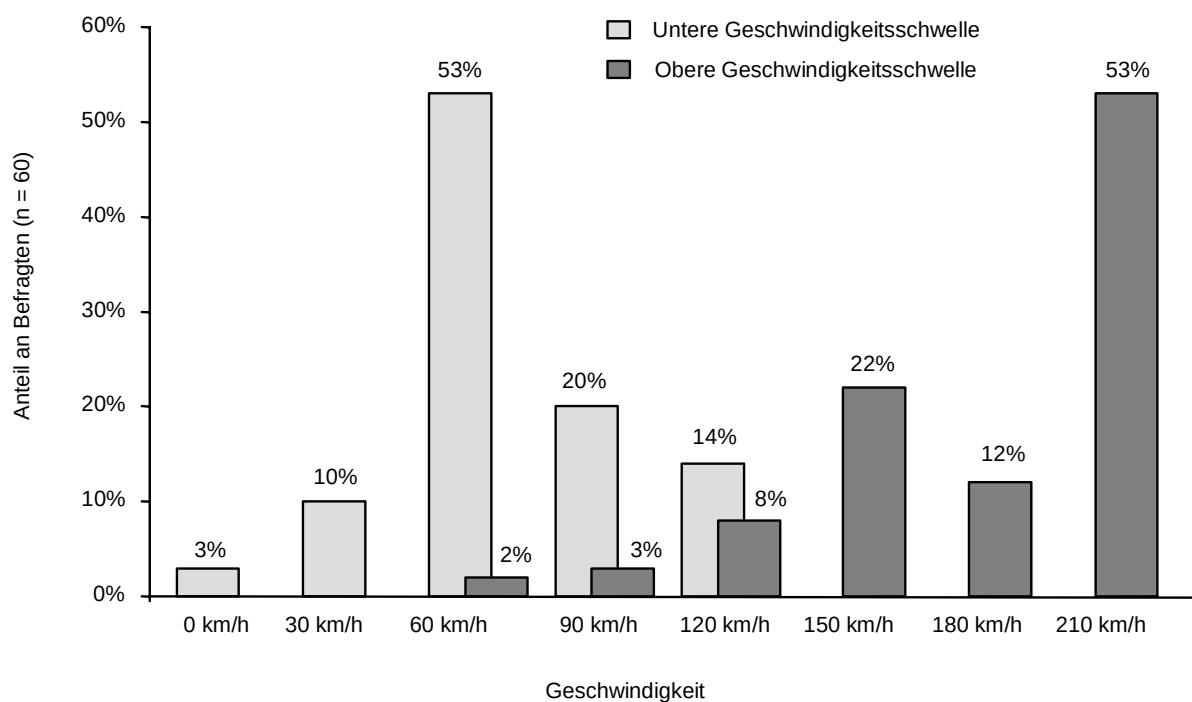


Bild 35: Befragungsergebnisse zur Kundenpräferenz in Bezug auf die Aktivierungs- bzw. Deaktivierungsschwelle des Querführungsassistenten

Eine von 53% der Befragten favorisierte, obere Geschwindigkeitsschwelle von 210 km/h macht deutlich, dass das System wenn möglich bis in hohe Geschwindigkeitsbereiche funktionieren sollte. Die Auswertung zeigt auch, dass eine untere Geschwindigkeitsschwelle von 60 km/h auf eine breite Zustimmung stößt. Für eine Unterstützung bei niedrigeren Geschwindigkeiten votieren nur 13%. Bereits die Unfalldatenanalyse zeigte, dass querführungsrelevante Unfälle verstärkt in für Autobahnen und Landstraßen üblichen Geschwindigkeitsbereichen stattfinden. Dort sind auch die Unfallfolgen erheblich. Die Multimediabefragung ergänzt nun, dass auch potentielle Kunden eine Unterstützung erst ab 60 km/h für sinnvoll erachten, eine Unterstützung auf Stadtstraßen bis zu einem Tempolimit von 50 km/h durch den Querführungsassistenten also nicht zwingend vorgesehen sein muss.

Auf diesen Erkenntnissen setzt die Frage an, wie die Aktivierung bzw. die Deaktivierung des Systems vollzogen werden soll. Wie die Befragung ergab, wollen nur 5% der Probanden bei Erreichen der Aktivierungsschwelle das System selbsttätig einschalten, 95% akzeptieren eine automatische Aktivierung des Systems. Insgesamt 65% wünschen sich dann aber eine Deaktivierungsmöglichkeit des Systems über einen Tastendruck, 35% akzeptieren auch, dass das System im Geschwindigkeitsbereich immer aktiv bleibt und nicht vom Fahrer deaktiviert werden kann. Im Ergebnis führt dies dazu, dass der Querführungsassistent sich- folgt man den hier präsentierten Untersuchungsergebnissen- ab etwa 60 km/h selbstständig aktiviert, trotzdem aber bei Bedarf jederzeit über ein Betätigungselement abgeschaltet werden kann.

3.2.4.2 Systemfunktionalität

Die Auswertung der Fragen zur Systemfunktionalität zeigt, dass 98% der Befragten eine Unterstützung des Systems beim Spurwechsel nach links wie nach rechts erwarten, nur etwa 2% befürworten eine Unterstützung des Spurwechsels nur nach links.

Auch das Blinkerbetätigungsverhalten der Verkehrsteilnehmer auf Autobahnen wurde thematisiert. Die Befragung zeigt zwar, dass 98% der Befragten die Notwendigkeit der Blinkerbetätigung beim Spurwechsel nach links erkennen, das Verhalten im Straßenverkehr zeigt oftmals aber ein anderes Bild. Der Querführungsassistent kann den Fahrer aber nur dann warnen, wenn er die Spurwechselabsicht des Fahrers erkennt. Blinkt der Fahrer nicht, muss das System die Spurwechselabsicht aus anderen Größen ableiten. Dann kann ein Spurwechsel nur über die Modellierung des Fahrerverhaltens und der Spurwechselabsicht erkannt werden. Obwohl verschiedene Ansätze in der wissenschaftlichen Landschaft diskutiert werden, verspricht keine eine dem Blinkersignal vergleichbare Zuverlässigkeit. Im Gegenteil sind solche Maßnahmen mit einem hohen Aufwand an Entwicklungszeit und Entwicklungskosten verbunden, ohne dass die Qualität der anschließenden Systemlösung von Anfang an abschätzbar ist. Aus diesem Grund ist es unerlässlich zu erfragen, ob der potentielle Kunde das System auch akzeptiert, wenn es sein zuverlässiges Blinken zur Unterstützung beim Spurwechsel notwendig machen würde, oder ob es sinnvoll erscheint, an weiterführenden Ansätzen zur Erkennung des Spurwechselwunsches auch ohne Blinkerbetätigung zu arbeiten. Das Befragungsergebnis zeigt hierzu ein differenziertes Bild. Für eine Mehrheit der Befragten scheint die Erkennung der Spurwechselabsicht nur über den Blinker, und der damit verbundene Zwang zur Blinkerbetätigung, der die Systemnutzung dann erst möglich macht, zu wenig zu sein. Für 65% der Versuchspersonen wäre ein Querführungsassistent, der die Absicht des Anwenders, die Spur zu wechseln, nur erkennt, wenn der Fahrer blinkt, einen nur beschränkten Nutzen aufweisen. Für den Rest würde die Notwendigkeit zur Blinkerbetätigung den Nutzen erhöhen oder nicht berühren. Aus diesem Grund sei auf Kapitel 6.5 verwiesen, in dem die Ansätze zur Spurwechselmotivationserkennung geschildert werden.

3.2.4.3 Mensch-Maschine-Schnittstelle

Die Aktionen des Systems können in unterschiedlichen Eskalationsstufen erfolgen. Betrachtet man den Spurwechselfall näher, so kann über eine Anzeige im Außenspiegel ein Warnsignal erfolgen, sobald der Fahrer den Blinker setzt, während sich ein Fahrzeug im Gefährdungsbereich auf der Nachbarspur befindet (*Warnstufe*). Eine *Informationsstufe* gibt bereits vorher einen Hinweis auf die Existenz von Fahrzeugen auf den Nachbarspuren, wenn der Blinker noch nicht gesetzt ist, und der Fahrer sich beispielsweise erst mit der Spurwechselvorbereitung beschäftigt. Die Frage nach der Relevanz einer solchen Informationsstufe als Ergänzung zu einer reinen Warnstufe zeigt ein uneindeutiges Bild. Etwa die Hälfte der Befragten wünscht sich zusätzlich zur Warnung beim Spurwechsel auch, dass das System sie mit Hilfe der Informationsstufe über eine belegte Nachbarspur informiert, auch wenn sie die Spur (noch) nicht wechseln wollen. Der anderen Hälfte reicht eine reine Warnstufe. Eine Entscheidung auf empirischer Basis muss daher späteren Untersuchungen vorbehalten bleiben.

44% der befragten Fahrer erwarten von ihrem System nicht, dass die Warnungen des Systems unauffällig gestaltet sind, um den Beifahrer nicht auf einen Fehlerfall aufmerksam zu machen. Einem Anteil von 28% ist es egal und ebenfalls 28% bevorzugen eine Warnung, die unauffällig an sie weitergegeben wird, so dass andere Passagiere im Fahrzeug davon keine Notiz nehmen können.

3.2.4.4 Kaufbereitschaft

Nicht nur die Sicherheit spielt bekanntlich eine Rolle bei der Entscheidung eines Fahrzeugkäufers für ein Sicherheitssystem. Daneben sind neben weichen Kaufentscheidungskriterien wie Komfort und Prestige auch Kostenaspekte verkaufsentscheidend. Bild 36 zeigt die Wichtigkeit von Sicherheit, Komfort und Betriebskostensparnis in der Kaufentscheidung der Befragten für einen Querführungsassistenten. Niedrige Betriebskosten sind neben einer Verringerung der Unfallwahrscheinlichkeit Haupteinflussfaktor auf eine Kaufentscheidung. Dabei ist eine Verbesserung des Komforts beim Kauf eines derartigen Systems für nur 32% der Befragten „eher wichtig“ oder „wichtig“.

Mit Hilfe der Methode des „Price Sensitivity Measurement (PSM)“ nach VAN WESTENDORP wurde die Preisbereitschaft zum Querführungsassistenten ermittelt³⁹. Jeder der Befragten musste dazu vier Fragen zum Produkt beantworten: Wann ist das Produkt seiner Meinung nach zu teuer (und er würde sich nie dafür entscheiden)? Wann ist das Produkt seiner Meinung nach zu billig (und er zweifelt an der Qualität)? Wann ist das Produkt teuer aber seinen Preis wert? Wann ist das Produkt billig? Aus diesen Werten ergeben sich vier Kurven deren Schnittpunkte den „Range of Accepted Prices“ abgrenzen. Bild 37 zeigt die Ergebnisse.

³⁹ zur weiterführenden Erklärung des Price Sensitivity Measurement sei auf die Arbeit von TRAVIS verwiesen [120]

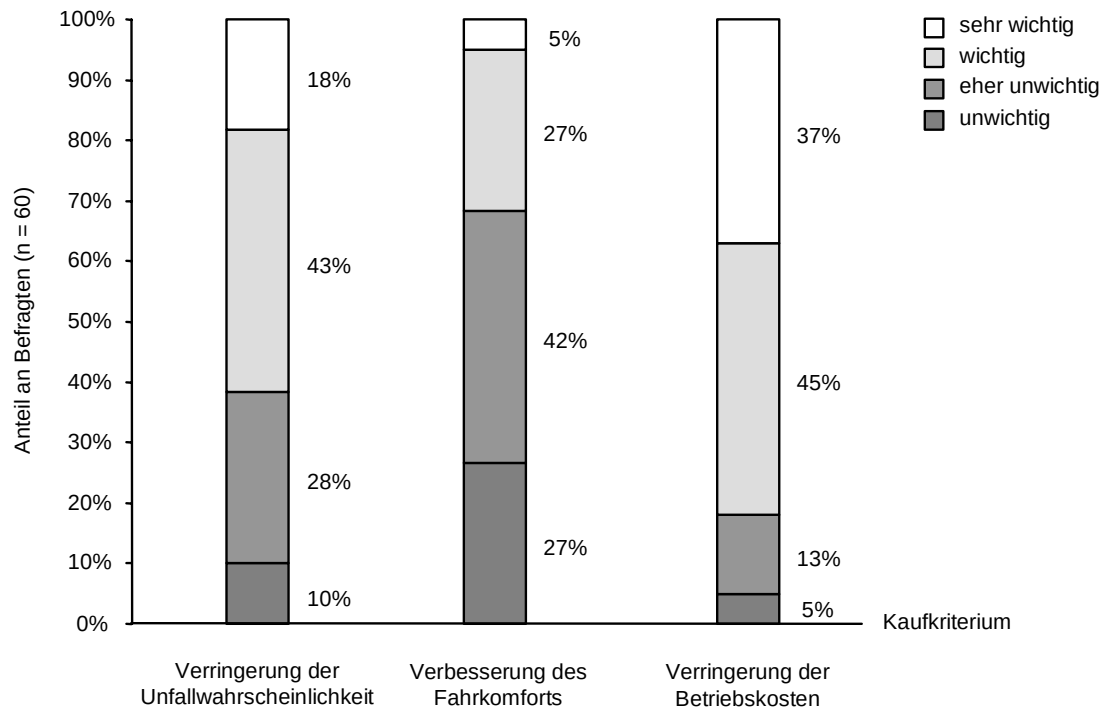


Bild 36: Befragungsergebnisse zu Einflussfaktoren auf die Kaufentscheidung für einen Querführungsassistenten

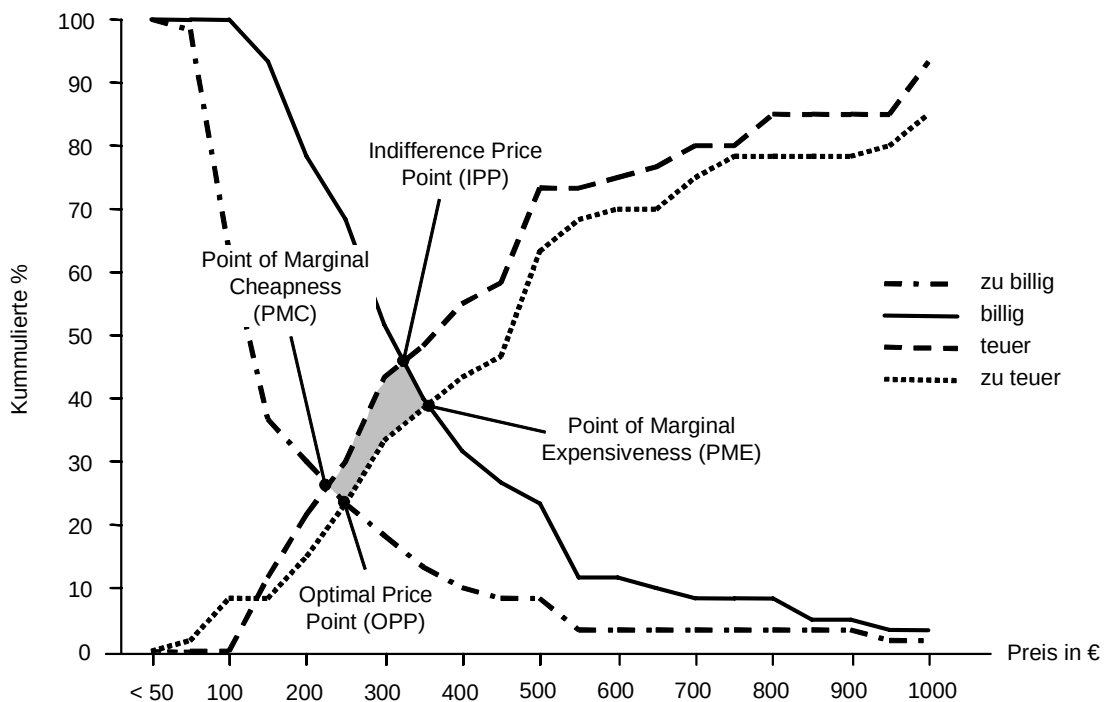


Bild 37: Price Sensitivity Measurement des Querführungsassistenten

Der „Point of Marginal Cheapness“ markiert denjenigen Preis, ab welchem die Bedeutung von vermuteten Qualitätsmängeln höheren Einfluss hat als die Preisvorteile. Der „Point of Marginal Expensiveness“ zeigt den Punkt, ab dem der zu teure Preis den Produktnutzen

übersteigt. Der „Indifference Price Point“ markiert den von den meisten Probanden erwarteten mittleren Preis für das Systems, während der „Optimal Price Point“ den Preis darstellt, der von der maximalen Anzahl der Befragten als Preis akzeptiert und von der minimalen Anzahl von Probanden nicht akzeptiert wird.

Der Bereich des akzeptierten Preises zwischen Verkaufspreisen von 200 und 350 EUR. Es liegt die Vermutung nahe, dass durch das persönliche Erleben des Systems im Fahrbetrieb die Preisbereitschaft steigt. Dies soll im Rahmen des abschließenden Versuchs zur Gesamtfunktionalität untersucht werden. Dessen Ergebnisse zur Messung der Preisbereitschaft finden sich in Kapitel 7.6.7.

3.2.5 Diskussion

Die Befragung lieferte hilfreiche Anregungen, die in der Spezifikation des Systems berücksichtigt wurden. Die Hypothese 3.2-1 erweist sich als richtig, die Befragung erlaubt Rückschlüsse auf die Kundenpräferenz hinsichtlich charakteristischer Merkmale. Die Tabelle 11 zeigt die Ergebnisse im Überblick.

Tabelle 11: Ergebnisübersicht der multimedialen Kundenbefragung

Themenkomplex	Ergebnisse
Aktivierung und Deaktivierung	- Unterstützung auf Autobahnen, innerstädtischen Hauptrouten, Landstraßen - Aktivierungsbereich 60 km/h bis 210 km/h - Aktivierung automatisch ab Geschwindigkeitsschwelle mit zusätzlicher Deaktivierungsmöglichkeit durch den Fahrer
Systemfunktionalität	- leichte Präferenz zur Spurwechselunterstützung auch ohne Blinkerbetätigung
Fahrer-Fahrzeug-Schnittstelle	- uneinheitliche Meinung zur zusätzlichen Informationsstufe bei der Spurwechselunterstützung - keine Beschränkung auf für Mitfahrer unauffällig gestaltete Warnungen
Kaufbereitschaft	- Kauffaktoren für QFA sind Betriebskostensparnis und Sicherheit - Preisbereitschaft zwischen 200 EUR und 350 EUR

Folgt man den Befragungsergebnissen muss der Querführungsassistent den Fahrer nicht auf Stadtstraßen unterstützen, eine Auslegung des Systems hin zu Autobahn, Landstraße und innerstädtischen Hauptrouten steht im Vordergrund. Die Aktivierung des Systems soll automatisch ab einer bestimmten Geschwindigkeitsschwelle (60 km/h) erfolgen, eine Deaktivierung des Fahrers (z.B. via Tastendruck) muss vorgesehen werden. Die Unterstützung muss symmetrisch links wie rechts erfolgen, eine Spurwechselabsichtserkennung hielt die Mehrzahl der Befragten für sinnvoll.

Rechnergestützte Befragungen - wie die hier vorgestellte - können mit ihren Ergebnissen bei der Spezifikation des Fahrerassistenzsystems helfen. Sie stellen dann eine wertvolle

Hilfe dar, wenn es um Themen geht, deren Abgleich mit dem Kundenwunsch in einem frühen Stadium der Produktentwicklung möglich ist. Ausgewählte Fragen zum Aktivierungs- bzw. Deaktivierungsbereich, zur Systemfunktionalität und zur Schnittstelle des Systems zum Fahrer können dabei wie vorgestellt anhand eines Probandenpools untersucht werden. Die Befragungsmethodik reicht aber dann an ihre Grenze, wenn das System zu komplex wird, um es in Textform oder mit Hilfe anderer Präsentationsmittel zu beschreiben. Gerade Fahrerassistenzsysteme machen ein persönliches Erleben der Funktionalität im Fahrvorgang notwendig. Erst mit Hilfe eines plastischen Modells oder eines Versuchsträgers können die Fragen zu oben genannten Themenkomplexen abschließend behandelt werden. Erst dann ist auch eine zuverlässige Einschätzung der tatsächlichen Preisbereitschaft potentieller Kunden und damit eine Einpreisung des Systems möglich. Es zeigt sich deutlich, dass die Ergebnisse der Befragung zur Systemfunktionalität und zur Mensch-Maschine-Schnittstelle des Querführungsassistenten zwar eine erste Orientierungshilfe geben können, unbedingt aber in Simulator- und Realfahrzeuguntersuchungen eingehender untersucht werden müssen.

3.3 Expertenbefragung zur Sensorarchitektur

Auch wenn technische Lösungen auf längere Sicht die Gesamtheit der Wahrnehmungsleistungen des Menschen und seine Fähigkeit zur Interpretation dieser Daten in variierenden Kontexten mit den verfügbaren Sensortechnologien sicher nur schwer erreichen können, sind die technischen Systeme dem Menschen in einzelnen Aspekten durchaus überlegen. Die Leistungsfähigkeit der Sensortechnik wird in einem kooperativ ausgelegten System ausgenutzt, um mit den durch das technische System gewonnenen Informationen den Fahrer bestmöglich in der sicheren Erfüllung seiner Fahraufgabe zu unterstützen.

Die Analyse des Unfallgeschehens und die frühzeitige Einbindung der Kundenwünsche können, wie vorgestellt, den Prolog zur Festlegung der Systemfunktionalität darstellen. Will man das System aber technologisch realisieren, es beispielsweise im realen Fahrzeug prototypisch umsetzen, um nähere Informationen über Leistungsfähigkeit und Sicherheitsnutzen gewinnen zu können, muss spätestens hier die Frage nach der technischen Umsetzbarkeit der Systemlösung beantwortet werden. Die Leistungsfähigkeit eines Fahrerassistenzsystems ist sehr stark davon abhängig, in welcher Qualität die Sensoren dem System die erforderlichen Informationen bereitstellen können. Es liegt auf der Hand, dass unterschiedliche Sensortechnologien prinzipbedingt unterschiedlichen Anforderungen gerecht werden können. Der möglichst strukturierten Auswahl und Bewertung der Sensorausstattung zur prototypischen Umsetzung eines bestimmten Assistenzsystems, die die Leistungsfähigkeit bestimmter Sensoren mit den Systemzielen vergleicht, kommt deshalb eine große Bedeutung zu.

Im Folgenden wird ein Überblick über die derzeit am Markt verfügbaren und für die Verwendung in einem Fahrerassistenzsystem geeigneten Sensoren gegeben. Im Rahmen

einer vom Autor geplanten, durchgeführten und ausgewerteten Expertenbefragung sollen die einzelnen Sensortechnologien vor dem Hintergrund der Verwendung in einem Querführungsassistenten bewertet und ein Vorschlag für eine geeignete Sensorplattform zur technischen Umsetzung der Funktionalität im Realfahrzeug abgeleitet werden.

3.3.1 Begriffsbestimmung

Unter einem Sensor versteht man ein Funktions- bzw. Bauelement, das mittels physikalischer oder chemischer Effekte zur Erfassung von physikalischen, chemischen oder elektrochemischen Größen und deren Umwandlung in elektrische Signale dient [79]. Sensoren stellen in einem Fahrerassistenzsystem die Schnittstelle zwischen der realen Welt und dem technischen System dar. Die Leistungsfähigkeit der gewählten Sensorkonfiguration beeinflusst in hohem Maße die Funktionalität des Gesamtsystems. Umfang und Qualität der verfügbaren Information bestimmen wesentlich den Grad und die Qualität der Unterstützung durch die Assistenzfunktion. Hinzu kommt, dass die informationsaufnehmenden Elemente eines Assistenzsystems einen wesentlichen Kostenfaktor darstellen. Für zukünftige Funktionen, in die zahlreiche Informationen von Umfeld, Fahrzeug und Fahrer Eingang finden, werden diversitäre, multisensorielle Ansätze mit entsprechender Signalverarbeitung notwendig. Ansätze zur Sensorfusion versuchen, die verschiedenen Informationsquellen zu verbinden, Fehler zu bereinigen, für mehr Robustheit und Redundanz zu sorgen und bei entsprechend hinterlegten Modellannahmen und Hypothesen die abgeleiteten Informationen zu einer Gesamtaussage zusammenzuführen. Hinzu kommt die Notwendigkeit, die Architektur an unterschiedliche Ausstattungsumfänge des Fahrzeugs anzupassen. Das macht eine flexibel auslegbare, allzeit offene und modular erweiterbare Architektur und eine Mehrfachnutzung der vorhandenen Sensorik-Ressourcen für unterschiedliche, aufeinander abgestimmte Assistenzfunktionen erforderlich.

Die in Fahrerassistenzsystemen verwendeten Sensoren werden meist in *Umweltsensoren* und *Fahrzeugzustandssensoren* unterschieden [64] [110]. Umweltsensoren sammeln Informationen über die Umgebung des Fahrzeugs, während Fahrzeugzustandssensoren interne Zustände des Fahrzeugs messen. Die Abbildung von Eigenschaften der Umwelt über Sensoren kann auf zwei unterschiedliche Arten erfolgen. Einerseits kann der Sensor aktiv elektromagnetische oder akustische Wellen aussenden und über die Auswertung der Laufzeitunterschiede der reflektierten Signale Rückschlüsse auf die Umwelt gewinnen (*aktive Sensoren*). Andererseits kann die Messung über eine Aufnahme vorhandener elektromagnetischer Wellen erfolgen (*passive Sensoren*).

3.3.2 Bewertungskriterien

Unterschiedliche Sicherheitssysteme stellen unterschiedliche Anforderungen an die verwendete Sensorik. Diesen Kriterien muss bei der Auswahl und Bewertung einzelner Sensortechnologien Rechnung getragen werden. Mit Hilfe der in der nachstehend vorgestellten Expertenbefragung involvierten Befragten wurden im Vorfeld allgemeine Kriterien zur

Bewertung von Sensortechnologien zu deren Verwendung im Bereich der Fahrerassistenz (FAS) erarbeitet („Allgemeiner FAS-Kriterienkatalog“). Diese sind in Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 12: Kriterienkatalog zur Bewertung von Sensoren bei Verwendung in Applikationen der Fahrerassistenz (Allgemeiner FAS-Kriterienkatalog)

Kriterium	Beschreibung
Sensorreichweite	Reichweite des Sensors in radialer Richtung
Öffnungswinkel	Winkelbereich, der durch einen Sensor abgedeckt werden kann
Messrate	Zykluszeit eines Sensors, die zwischen den Einzelmessungen vergeht
Sensorsignalverarbeitung	Aufwand zur Aufbereitung und Verarbeitung der Sensorsignale
Mehrzielfähigkeit	Fähigkeit eines Sensors, mehrere Ziele gleichzeitig zu detektieren und zu verfolgen
Störfestigkeit	Elektromagnetische Verträglichkeit des Sensors (auch gegenüber Verbau in benachbarten Fahrzeugen)
Kosten	Einzelkosten des Sensors und der Sensordatenverarbeitung
Witterungsunabhängigkeit	Unabhängigkeit der Leistungsfähigkeit des Sensors von Umwelteinflüssen (Regen, Sonneneinstrahlung,...)
Integrationsfähigkeit	Möglichkeit zur platzsparenden, unauffälligen und designunkritischen Integration ins Fahrzeug
Zulassungsfähigkeit	Zulassungsfähigkeit des Sensors zur weltweiten Benutzung in Automobilen
Diagnosefähigkeit	Möglichkeit des Sensors zur Erkennung des eigenen Fehlerstatus
Kalibrieraufwand	Aufwand zur Einstellung und Ausrichtung des Sensors vor und während der Verwendung im Fahrzeug

Der Querführungsassistent stellt in Ergänzung zum allgemeinen FAS-Kriterienkatalog zusätzliche, applikationsspezifische Anforderungen. Ein zweiter Katalog soll diese allgemeinen Kriterien um diejenigen Kriterien erweitern, die sich aus den speziellen Anforderungen des Querführungsassistenten (QFA) ergeben („Spezieller QFA-Kriterienkatalog“). Diese lassen sich aus den Systemzielen und dem Situationskatalog ableiten und sind in Tabelle 13 dargestellt.

Tabelle 13: Kriterienkatalog zur Bewertung von Sensoren bei Verwendung in einem Querführungsassistenten (Spezieller QFA-Kriterienkatalog)

Kriterium	Beschreibung
Relativgeschwindigkeit	Genauigkeit der Messung/ Schätzung der Relativgeschwindigkeit von Fremdobjekten
Lage und Abstand	Genauigkeit der Messung/ Schätzung des Abstands und der Lage von Fremdobjekten
Fahrspurerkennung	Fähigkeit zur Erkennung der Fahrspurmarkierungen, des Fahrspurverlaufs und der Ablage
Fahrspurzuordnung	Fähigkeit zur Zuordnung von Fremdfahrzeugen zu Fahrspuren
Objektklassifizierung	Fähigkeit zur Klassifizierung der erkannten Fremdobjekte (z.B. Pkw, Lkw, Fußgänger)
Objektkonturen	Genauigkeit der Messung/ Schätzung der Objektkonturen (z.B. Breite, Höhe) von Fremdobjekten
Unterscheidungsfähigkeit	Fähigkeit zur Unterscheidung zwischen relevanten Objekten und irrelevanten Detektionszielen
Sensorfusion	Möglichkeit zur Verwendung mit anderen Sensoren im Rahmen einer Sensorfusion
Geschwindigkeitsunabhängigkeit	konstante Leistungsfähigkeit unabhängig von der Eigengeschwindigkeit

Um die Systemfunktionalität sicherstellen zu können, ist für das System beispielsweise die Informationen darüber erforderlich, wo sich die Fahrspuren befinden, wie der Fahrspurverlauf in Vorausschau zu erwarten ist und mit welcher Ablage das eigene Fahrzeug sich in der Fahrspur befindet (Kriterium „Fahrspurerkennung“). Nur mit Hilfe dieser Informationen kann ein Verlassen der Fahrspur frühzeitig erkannt werden und die erforderliche Reaktion an den Fahrer weitergegeben werden. Um den Spurwechsel abzusichern, muss das System über die Sensoren Informationen zu den umgebenden Fremdfahrzeugen gewinnen können. Besonders die Lage der Fremdfahrzeuge im fahrzeugfesten Koordinatensystem („Lage und Abstand“) und die gefährdungsbeeinflussenden Annäherungsparameter („Relativgeschwindigkeit“) sind von hohem Interesse. Das System sollte in der Lage sein, die detektierten Fremdfahrzeuge auf die einzelnen Fahrspuren abbilden zu können. Nur so ist eine Berechnung der Gefährdung beim Spurwechsel möglich, ohne dass Fahrzeuge, die sich in nicht relevanten räumlichen Bereichen aufhalten, zu einem Eingriff des Systems führen („Fahrspurzuordnung“). Das Wissen um Konturen und Ausdehnung („Objektkonturen“) bzw. Art des erkannten Objektes („Objektklassifikation“) können wichtige Eingangsgrößen sein, müssen zur Umsetzung der Systemfunktionalität allerdings nicht zwingend vorausgesetzt werden. Essentiell ist in diesem Zuge jedoch die Fähigkeit des Sensors, relevante Objekte (z.B. Fremdfahrzeuge im seitlichen Kollisionsbereich) von irrelevanten Objekten (z.B. Laternenmasten, Fremdfahrzeuge, die zurückfallen) zu unterscheiden („Unterscheidungsfähigkeit“). Als übergeordnete Kriterien kann die mögliche Einbindung des Einzelsensors in eine Sensorfusionsarchitektur und die möglichst von der Eigengeschwindigkeit unabhängige Leistungsfähigkeit gelten.

3.3.3 Befragungsziel

Eine vom Autor der vorliegenden Arbeit durchgeführte Expertenbefragung soll dazu dienen, die Auswahl der Sensoren für den Querführungsassistenten zu methodisieren. Als Experten gelten in diesem Zuge firmeninterne Entwickler, die im Rahmen ihrer Tätigkeit fundierte Erfahrungen über verschiedene Sensortechnologien, deren Stärken und Schwächen und deren Verwendung in der Fahrerassistenz gesammelt haben. Anhand dieser Kriterienkataloges sollen im Folgenden die derzeit am Markt verfügbaren Sensortechnologien bewertet werden, um so für jeden relevanten Sensor eine eindeutige Analyse der Stärken und der Schwächen vollziehen zu können. So soll schlussendlich ein Vorschlag für eine Sensorplattform gemacht werden, die unter umfassender Betrachtung aller relevanten Kriterien eine bestmögliche Umsetzung der Funktionalität des Querführungsassistenten garantiert.

3.3.4 Expertenpool

An der Befragung nahmen 11 Mitarbeiter aus der Technischen Entwicklung der AUDI AG und der AUDI Electronics Venture GmbH statt. Diese sind in verschiedenen Organisationseinheiten zur Serien- und Vorentwicklung von Fahrerassistenzapplikationen und Sensorfusionslösungen tätig. Die ausgewählten Personen verfügen damit im Rahmen ihres Aufgabenbereichs über fundierte Kenntnisse im Bereich der Sensortechnik für Fahrerassistenzsysteme.

3.3.5 Befragungsmethode

Die Befragung erfolgte in zwei Teilen. Die Meinung der Experten wurde sowohl in Einzelgesprächen als auch mit Hilfe eines Fragebogens eruiert. Welche Bewertungskriterien eine zuverlässige Einschätzung der Leistungsfähigkeit bestimmter Sensoren für ihre Anwendung allgemein in der Fahrerassistenz und speziell bei einem Querführungsassistenten erlauben, wurde dabei innerhalb der Interviews diskutiert und dokumentiert. Im Rahmen des Fragebogens wurden anschließend ausgewählte, am Markt verfügbare Sensortechnologien anhand der vorhergehend entwickelten Bewertungskataloge eingestuft.

Die zu bewertenden Sensoren zeigt Tabelle 14. Die Auswahl der zur Befragung gestellten Sensoren entstammte einer vorangehenden Untersuchungen des Autors, wurde in den Einzelgesprächen mit den Experten konkretisiert und validiert und konnte im Fortgang der Befragung als gegeben betrachtet werden. Die Bewertung der verschiedenen Sensoren durch die Befragten erfolgte anhand einer 6-stufigen unipolaren Skala⁴⁰, die – angelehnt an die in Deutschland gebräuchliche schulische Bewertungsskala - eine intuitive Leistungsbeurteilung möglich machte.

⁴⁰ auf einer Skala von 1 bis 6 entspricht: 6 = „ungenügend“, 5 = „mangelhaft“, 4 = „ausreichend“, 3 = „befriedigend“, 2 = „gut“, 1 = „sehr gut“

Tabelle 14: Zu bewertende Sensortechnologien

Basistechnologie	Bauartvertreter		
Radar	Radar 77 GHz	Breitbandiges, pulsmoduliertes Radar ("UWB") 24 GHz	schmalbandiges, moduliertes Dauerstrichradar 24 GHz
Laser	Multibeamlaser	Laserscanner	
Videosensorik	Mono-Videosensorik in CMOS	Stereo-Videosensorik in CMOS	

Da nicht alle Befragten umfassende Kenntnisse zu allen zur Befragung gestellten Sensoren vorwiesen, mussten diese angeben, zu welcher Sensortechnologie sie mangels Fachkenntnis keine Aussage treffen konnten, zu welcher sie genügend Fachwissen vorwiesen und zu welcher sie sich als Experten einschätzen. Diese Einschätzung wurde zur Gewichtung der Aussagen eingesetzt. Die sowohl anhand des Fragebogens als auch in den persönlichen Gesprächen gewonnenen Erkenntnisse werden im Folgenden dargestellt. Die Ergebnisse wurden anschließend beim Aufbau der Sensortopologie des für die Fahrversuche notwendigen Versuchsträgers umgesetzt.

3.3.6 Sensorbewertung

Die eben vorgestellten Kriterienkataloge bilden die Grundlage zur Bewertung der einzelnen technologischen Varianten. Jene sollten sowohl die allgemeinen als auch die applikationsspezifischen Kriterien erfüllen. Im Folgenden werden dazu für die Basistechnologien Radar, Lidar und Video die jeweiligen Stärken und Schwächen dargestellt. Die Aussagen entstammen zu großen Teilen den Expertengesprächen. Die Darstellungen werden ergänzt durch die Ergebnisse der statistischen Auswertung des Fragebogens.

3.3.6.1 Radarsensorik

Radarsensoren⁴¹ zählen zu den aktiven Sensoren und sind in automobiltechnischen Anwendungen schon seit Jahren bekannt [110]. Je nach Anforderungen können Radarsysteme verschieden ausgelegt werden. Als Variablen operieren hierbei die Wahl des Frequenzbandes (24 GHz. vs. 77 GHz.), die benötigte Bandbreite (Schmalband vs. Ultra-Breitband) und die Modulation des Sendesignals (Pulsbetrieb vs. Dauerstrich).

Für die Verwendung im Fahrzeug sind international die Frequenzbänder von 24 bis 24,25 GHz (ISM-Band) und von 76 bis 77 GHz (W-Band) freigegeben. 24 GHz-Radare haben im Vergleich zu 77 GHz-Lösungen den Vorteil, dass bereits bestehende, bis 21 GHz zugelassene integrierte Schaltungen auch in diesem Frequenzband kostenoptimiert eingesetzt

⁴¹ RADAR steht für **R**adio **D**etection **A**nd **R**anging ursprünglich aber **R**adio **A**ircraft **D**etection **A**nd **R**anging

werden können. Solche Radarsysteme, welche speziell im für den Automobilbereich freigegebenen Frequenzband um 77 GHz operieren, bedingen eigene technische Lösungen fern des Massenmarktes, die zusätzlich aufgrund der höheren Frequenz auch die gestiegenen Anforderungen an Bauteilqualität z.B. an Leiterbahnen und Oberflächengüte umsetzen sollten. Dies manifestiert sich im Vergleich zu den 24 GHz-Radarlösungen in einem um den Faktor 5 bis 6 höheren Preis. Der Vorteil der höheren Frequenz liegt in der Möglichkeit, entweder den Platzbedarf zu optimieren und die Antenne zu verkleinern oder aber bei gleicher Antennengröße die vorhandene Leistung besser zu bündeln, um dadurch einen höheren Antennengewinn⁴² zu erzielen. Je stärker der zu überwachende Bereich bestrahlt wird, desto weiter entfernte Reflektoren können detektiert werden.

In der Automobiltechnik werden vorrangig so genannte Primärradare verwendet, bei denen die Messung auf der vom Zielobjekt reflektierten elektromagnetischen Welle basiert. Sowohl im ISM- als auch im W-Band werden zwei Hauptklassen unterschieden: der Pulsradar und der CW⁴³-Radar (auch Dauerstrichradar). Zur Abstandsmessung beim *Pulsradar* werden in gleichmäßigen Abständen Impulse mit konstanter Trägerfrequenz und definierter Pulsbreite ausgesendet. Durch das ständige Umschalten der Betriebsart ist zeitlich nacheinander ein Senden und Empfangen möglich. Die Entfernung zum Zielobjekt lässt sich aus der Laufzeit des Pulses der reflektierten Wellen ermitteln. Der Ablauf wird dabei periodisch mit der Pulsfolgefrequenz wiederholt. Werden nacheinander mehrere Pulse ausgesendet, so kann nach dem Puls-Doppler-Prinzip über die Phasenänderung im Reflexionssignal die Objektgeschwindigkeit ermittelt werden. Die Relativgeschwindigkeit zu einem Objekt wird mit Hilfe einer Fast-Fourier-Transformation durch Bestimmung der Dopplerfrequenz⁴⁴ bestimmt. Das Erfassen auch von mehreren Zielen zur selben Zeit ist möglich, da unterschiedlich weit entfernte Ziele unterschiedlich lange Laufzeiten zwischen Sende- und Empfangssignal zur Folge haben und damit eine eindeutige Zuordnung möglich ist. Die Messung der Relativgeschwindigkeit mit dem Doppler-Effekt ist umso genauer, je länger das ausgedehnte Signal andauert und empfängerseitig beobachtet bzw. ausgewertet wird. Zur Messung von Relativgeschwindigkeiten wird also idealerweise ständig ein Signal ausgesendet. Je kürzer die Pulse eines Pulsradars, desto ungenauer die Messung der Relativgeschwindigkeit über den Doppler-Effekt. Bei den Vertretern der *CW-Radare* wird ein kontinuierliches Signal mit einer konstanten Amplitude ausgesandt. Um zu erreichen, dass der CW-Radar neben Relativgeschwindigkeiten auch Informationen über die Entfernung zu einem Objekt liefert, werden mit der Frequenz- oder der Phasenmodulation Ansätze verfolgt, das Signal zu modulieren.

⁴² Als Maß für die Empfindlichkeit einer Antenne gibt man den Gewinn an. Er sagt aus, wieviel mehr Empfangsspannung eine Antenne abgibt als ein Faltdipol. Im allgemeinen geben die Antennenhersteller den Leitungsgewinn im logarithmischen Verhältnismaß an.

⁴³ CW steht für **C**ontinuous **W**ave

⁴⁴ Als Doppler-Effekt bezeichnet man das Phänomen, bei welchem sich die Frequenz einer Welle ändert, wenn sich ein Beobachter relativ zu dem Erreger bewegt. Nähert sich der Beobachter mit konstanter Geschwindigkeit einem ruhenden Erreger, so nimmt die Frequenz zu, entfernt er sich, nimmt sie entsprechend ab.

Eine im Fahrzeugbau übliche Variante ist der *frequenzmodulierte Dauerstrichradar (FMCW⁴⁵)*. Durch die Modulation der Frequenz über die Laufzeit entsteht eine Frequenzdifferenz zwischen der Sende- und Empfangsfrequenz, über die sich bei einem bewegten Ziel mit Hilfe der Dopplerfrequenz und der Wellenlänge die Relativgeschwindigkeit ermitteln lässt.

Heute werden bei den 24 GHz-Radaren im Wesentlichen zwei Ansätze verfolgt. Der eine Ansatz nutzt ein extrem breitbandiges, pulsmoduliertes Radar (UWB⁴⁶, SRR⁴⁷), der zweite ein schmalbandiges, moduliertes Dauerstrichradar. Je schmalbandiger das Signal ist, desto größer die Reichweite, je breitbandiger das Signal, desto besser die Entfernungsauflösung. Aber gerade die Breitbandigkeit stellt im ISM-Band zulassungsrechtliche Fragen. Die extrem kurzen Pulse der 24 GHz-UWB-Radare belegen eine Breite von ca. 5 GHz um 24,125 GHz, was zu Befürchtungen der Benutzer angrenzender Frequenzbänder führt, da diese ihre dortigen Aktivitäten beeinflusst sehen. Das Industriekonsortium SARA⁴⁸ hat deshalb zum Ziel, weltweit und insbesondere für Europa die Funkzulassung von 24 GHz-UWB-Kfz-Radaren möglich zu machen.

Die Tabelle 15 zeigt die Stärken und Schwächen verschiedener Radarprinzipien, wie sie die Befragung der Expertengruppe nach Auswertung des Fragebogens ergeben hat. Bewertet werden sollten die im Automobilbereich bekannten, vorstehend vorgestellten Lösungen. Ein 77 GHz-Radar, wie er sich beispielsweise bereits bei abstandsbasierenden Tempomaten im Serieneinsatz befindet, wurde neben dem, besonders in Vorentwicklungskreisen bekannten 24 GHz-CW-Radar und dem 24 GHz-UWB-Radar nach verschiedenen Kriterien bewertet.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Vorteile der Radare neben der möglichen, relativ großen Reichweite in ihrer weitgehenden Unabhängigkeit von Umwelteinflüssen, wie Spritzwasser, Dunkelheit, Nebel, Regen und Schnee liegt [110] [118] [125]. Zudem macht sie die Möglichkeit des verdeckten Einbaus beispielsweise hinter dem Kühlergrill oder der Stoßstange für Anwendungen im Fahrzeug interessant. Daneben ist der Radar in der Lage, durch Reflexionen auf der Straßenoberfläche auch Signale solcher Objekte wahrzunehmen, die verdeckt liegen [102]. Mehrkeulige Radare in einem Frequenzbereich um 77 GHz werden somit typischerweise im Fernbereich mit Entfernungen von 120 bis ca. 200 Meter betrieben [58] [52] [102]. Sie sind in der Lage, in einem schmalen Winkelbereich bis zu $\pm 10^\circ$ Abstand und radiale Differenzgeschwindigkeit relativ präzise zu messen. Weitwinklige 24 GHz-Radare werden üblicherweise für die Erfassung im Nah- und Mittelbereich bis 40 Meter eingesetzt.

⁴⁵ FMCW steht für **F**requency **M**odulated **C**ontinuous **W**ave

⁴⁶ UWB steht für **U**ltra-**W**ide-**B**and-Radar

⁴⁷ SRR steht für **S**hort-**R**ange-**R**adar

⁴⁸ SARA steht für **S**hort **R**ange **A**utomotive **R**adar Frequency **A**llocation

Tabelle 15: Bewertung verschiedener Radarprinzipien nach dem allgemeinem FAS-Kriterienkatalog⁴⁹

Kriterium	77-GHz-Radar	24-GHz-UWB-Radar	24-GHz-CW-Radar
Sensorreichweite	++	- / - -	+
Öffnungswinkel	- -	+	+
Messrate	o	+	o
Sensorsignalverarbeitung	o / -	-	-
Mehrzielfähigkeit	++	++	+
Störfestigkeit	+	+	+
Kosten	--	o	-
Witterungsunabhängigkeit	+	+	+
Integrationsfähigkeit	o	+	+
Zulassungsfähigkeit	++	ungen.	+
Diagnosefähigkeit	++	+	+
Kalibrieraufwand	- / - -	o	-

3.3.6.2 Lidarsensorik

In der Lasermesstechnik⁵⁰ werden, basierend auf der Lidartechnologie⁵¹, elektromagnetische Wellen als Mittel zur Entfernungsmessung eingesetzt. Die Wellenlänge liegt mit 0,78 µm bis 1,0 µm am Rande bzw. außerhalb des menschlichen Sichtbereiches. Aufgrund der geringen Kosten, der kleinen Abmessungen und des günstigen Wirkungsgrades kommen im Kraftfahrzeugbereich nur die Halbleiterlaser (Freie-Elektronen-Laser) zum Einsatz. Die verwendeten Lasersensoren müssen der Laserklasse 1 angehören, d.h. augensicher sein. Damit bleibt die Sendeleistung und demzufolge die Reichweite begrenzt.

Es existieren verschiedene Verfahren zur Entfernungsmessung auf Basis der Lasertechnologie, wobei sich alle Messverfahren die Reflexion des emittierten Lichts am Messobjekt zunutze machen. Für einen Einsatz zur Entfernungsmessung im Kraftfahrzeugbereich kommen theoretisch das Laufzeit- und das Dopplerverfahren in Frage. Wegen des höheren Aufwands bei der Auswertung des Dopplerverfahrens aufgrund der dabei vorliegenden hohen Sende- und Empfangsfrequenzen wird aber für Fahrzeugapplikationen praktisch nur das Laufzeitverfahren verwendet. Dabei wird das reflektierte Signal von einer Photodiode erfasst und in ein elektrisches Signal umgewandelt. Die Laufzeit zwischen dem Sendepuls und dem Empfangssignal dient dabei zur Bestimmung der Entfernung. Nicht über Doppler-Effekt sondern über Differentiation wird aus der Abstandsänderung zwischen zwei Messungen die Relativgeschwindigkeit ermittelt.

⁴⁹ der jeweils über alle Befragten berechnete Medianwert wird dabei nach folgendem Schema in die Bewertungskategorien umgerechnet: Median von 1,0 führt zu „sehr gut (++)“, Median von 2,0 führt zu „gut (+)“, Median von 3,0 führt zu „befriedigend (o)“, Median von 4,0 führt zu „ausreichend (-)“, Median von 5,0 führt zu „mangelhaft (- -)“, Median von 6,0 führt zur Bewertung „ungenügend (ungen.)“

⁵⁰ LASER steht für **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation

⁵¹ LIDAR steht für **L**ight **D**etection **A**nd **R**anging

Der Öffnungswinkel eines einzelnen Lasers entspricht seiner Strahldivergenz. Um einen größeren Messbereich überdecken zu können, bietet sich entweder der Einsatz eines Sensors mit mehreren Keulen (Multibeamlaser) oder eines scannenden Systems an (Laserscanner). Der *Multibeamlaser* ist ein mehrkanaliger Lasersensor mit fester Strahlcharakteristik, während der *Laserscanners* gepulste Laserstrahlen aussendet, die die Umgebung mit Hilfe eines rotierenden Prismas bis zu einem Winkel von 360 Grad abtasten können. Für jeden Winkel wird die Laufzeit des Lichtimpulses durch die Empfangsdiode gemessen, so dass die Entfernung zum Reflektor berechnet werden kann.

Die Auflösungsgrenze der laserbasierten Sensoren liegt bei etwa 0,5 bis 1mm [119] [2]. Die erzielten Genauigkeiten der Lidarsensoren entsprechen bei der Abstandsmessung denen der Radarsysteme (vgl. Tabelle 16). Allerdings erlaubt die hohe Auflösung über einen größeren Winkelbereich wesentlich präzisere Abbildungen der Objektkontur, als dies bei den Radarsystemen möglich ist. Mit ihnen ist aber - wie bei Radarsystemen auch - keine Spurdetektion und eine nur mittelmäßige Spurzuordnung möglich. Zudem werden durch die prinzipbedingten Nachteile in der (Relativ-)Geschwindigkeitsmessung und durch wandernde Reflexzentren irrelevante Strukturen am Straßenrand häufig als fahrende Ziele identifiziert, was eine hohe Falschalarmrate bedingt [106].

Tabelle 16: Bewertung verschiedener Lidarprinzipien nach dem allgemeinen FAS-Kriterienkatalog ⁴⁹

Kriterium	Multibeamlaser	Laserscanner
Sensorreichweite	++	+
Öffnungswinkel	-	+
Messrate	+	o / -
Sensorsignalverarbeitung	+	+
Mehrzielfähigkeit	++	+
Störfestigkeit	+	+
Kosten	o	o
Witterungsunabhängigkeit	o	o
Integrationsfähigkeit	o	--
Zulassungsfähigkeit	+	+
Diagnosefähigkeit	++	++
Kalibrieraufwand	+	+

Die Verwendung von Lasersensoren in automobilen Anwendungen wirft darüber hinaus zahlreiche Fragen auf. Schwierigkeiten ergeben sich bei der Klassifizierung scannender Systeme, da hier der Laserpuls nicht immer in die gleiche Richtung ausgesendet wird. Für sich betrachtet, sind die in Laserscannern verwendeten Laser ohne Scanner zumeist nicht augensicher und werden erst durch den Scanvorgang zu Klasse1 Lasersystemen. Besonders die Integration der Systeme kann nicht zufrieden stellend gelöst werden. Die Grundbedingung für den Einsatz eines Lidarsensors im Fahrzeug ist ein für Infrarotstrahlen frei-

es Sichtfeld. Das heißt, der Sensor kann nicht beliebig verdeckt eingebaut werden. Selbst die gewöhnliche Wärmeschutzverglasung der Windschutzscheibe stellt eine starke Dämpfung der Sensorleistung dar [125]. Lasersensoren sind weiterhin empfindlich gegenüber Umwelteinflüssen wie Regen, Schnee und Nebel. Diese führen unter Umständen zu einer Verkürzung der Sichtweite, da bereits an den Flüssigkeitstropfen in der Luft Licht reflektiert wird. Ähnliches gilt für die Verschmutzung des Sensors, die Energie des Strahls absorbiert. Auch eine Verschmutzung des Zieles wirkt dämpfend, da dadurch dessen Reflektanz herabgesetzt wird [125].

3.3.6.3 Videosensorik

Der Mensch steuert ein Fahrzeug vornehmlich nach optisch wahrgenommenen Informationen, weshalb fast die gesamte Infrastruktur im öffentlichen Straßenverkehr auf optische Wahrnehmung ausgelegt ist [2]. Wenn diese Informationen auch für technische Systeme zur Verfügung stehen sollen, kommt nur die Videosensorik in Frage. Sie ist von allen vorgestellten Sensortechnologien in ihren Eigenschaften am ehesten mit den Augen eines menschlichen Fahrers zu vergleichen.

Kameras sind passive Sensoren und bestehen im Wesentlichen aus einer fokussierenden Linse und einem lichtempfindlichen elektronischen Chip. Die Größe des Chips und die vorgeschaltete Optik legen den Öffnungswinkel und somit den Erfassungsbereich fest. Der Chip setzt sich aus einem zweidimensionalen Feld von Einzelsensoren zusammen, die elektromagnetische Wellen aus dem sichtbaren Lichtspektrum oder aus dem Wellenlängenbereich der Wärmestrahlung detektieren und in elektrische Signale proportional zu den Intensitätswerten umsetzen. Kamerasysteme im Fahrzeug müssen äußerst hohen Anforderungen genügen. Von ihnen wird eine Leistungsfähigkeit verlangt, die mindestens der des menschlichen Auges entspricht. Besonders bei sehr schneller und/oder sehr starker Änderung der Lichtverhältnisse (z.B. bei Tunnellein- bzw. Tunnelausfahrten, Blendung durch Scheinwerfer entgegenkommender Fahrzeuge) stoßen die Systeme, anhängig von ihrer technologischen Auslegung an ihre Grenzen. Die von der Bildverarbeitung zu bewältigende Lichtdynamik bewegt sich bei Anwendung in der Fahrerassistenz bei etwa 120 dB (siehe Tabelle 17).

Tabelle 17: Beleuchtungsstärken für verschiedene Szenencharakteristiken

Szenencharakteristik	Beleuchtungsstärke in lx
Mondlose klare Nacht	0,0003
Vollmondlicht	0,2
Straßenbeleuchtung in Nebenstraßen	0,5-1,5
Xenon Abblendlicht [50 m]	20
Xenon Abblendlicht [150 m]	1
Sonnenlicht im Winter	10000
Sonnenlicht im Sommer	100000

Neben der CCD⁵²-Technologie gewinnt die CMOS⁵³-Technik zunehmend an Bedeutung. Ein in CCD-Technik aufgebauter Chip akkumuliert Ladungen in Abhängigkeit von der einfallenden Lichtmenge linear über die Zeit (zeitliche Integration). Je kürzer die Integrationszeit ist, desto schärfer werden die Bilder in bewegten Szenen. Der so genannte „Shutter“ bestimmt und regelt elektronisch die Integrationszeit. Die Chips in CCD-Technik weisen eine lineare Empfindlichkeit (lineare Kennlinie) auf, die eine Dynamik von lediglich 60 dB umfasst [101]. Bei Szenarien, die sowohl sehr helle als auch dunkle Bereiche enthalten, kann bei CCD-Kameras nur über die Einstellung der Blende geregelt werden. Dies hat zur Folge, dass bei kleinerer Blende die dunklen Bereiche und bei größerer Blende die hellen Bereiche nicht mehr erkannt werden. Bei abrupten Helligkeitswechseln und bei hohen Helligkeitsunterschieden innerhalb des Bildes geraten sie somit schnell an ihre Grenzen. Die Stärke der CCD-Technik liegt in der unerreicht hohen Leistungsfähigkeit bei der Signalempfindlichkeit und beim Bildrauschen. Allerdings beschneidet ihre Neigung zur Überstrahlung benachbarter Bildpunkte durch helle Lichtquellen, das so genannte *Blooming*, das beispielsweise bei den Scheinwerfern entgegenkommender Fahrzeuge auftritt, ihre Möglichkeiten zur Verwendung für Fahrerassistenzsysteme im Fahrzeug bei Nacht.

Abhilfe zumindest in einigen Punkten verspricht hier der Einsatz von *CMOS-Sensoren*. Diese zeigen im Vergleich zu CCD-Bildaufnehmern Vorteile: sie bieten durch ihre logarithmische Empfindlichkeit (logarithmische Kennlinie) die Möglichkeit, Bilder hoher Dynamik zu erfassen. Bildaufnehmer in CMOS-Technologie bieten neben einem geringeren Energiebedarf und einer beschleunigten Auslesegeschwindigkeit die Möglichkeit, jedes einzelne Pixel (oder auch eine Gruppe von Pixel) anzusteuern. Dadurch ist es möglich, die Bildrate zu erhöhen, wenn nur kleinere „Areas of Interest“ betrachtet werden sollen. Zudem zeigen sie aufgrund ihrer Architektur eine deutlich geringere Neigung zu Streifen bzw. Schlierenbildung und zum „Blooming“.

Die größte Herausforderung beim Einsatz von Bildverarbeitungssystemen liegt in der Verarbeitung der Kamerarohdaten. Diese soll eine Interpretation der Umgebung erlauben und kann beliebig komplex gestaltet werden. Hier bemüht man sich, Verfahren zu entwickeln, die möglichst schnell und effizient die Bildauswertung übernehmen und bereits heute schon eine zuverlässige Erkennung und Verfolgung von Fahrzeugen in Videobildern möglich machen. Bei *form- und texturbasierten Verfahren* werden bestimmte Bereiche, die auch als *Region of Interest (ROI)* bezeichnet werden, auf das Vorhandensein bestimmter Objekte hin überprüft. In der Literatur finden sich fünf markante Merkmale, die immer wieder mit dem Vorhandensein von Fahrzeugen in Verbindung gebracht werden: Textur, horizontale und vertikale Kanten, Schatten, Reifen und Lichter sowie Symmetrie. Zur Ermittlung des Spurverlaufs der Straße, dem so genannten RDT⁵⁴, wird die Fahrspur mittels Kantenextraktion durch Erkennung von Helligkeitsunterschieden in vorher festgelegten

⁵² CCD steht für **C**harged **C**oupled **D**evelopes

⁵³ CMOS steht für **C**omplementary **M**etal **O**xide **S**emiconductor

⁵⁴ RDT steht für **R**oad **D**etection and **T**racking

Bereichen des Videobildes bestimmt. Die Kanten werden interpretiert und gegebenenfalls als Fahrbahnmarkierungen identifiziert, aus denen dann die Querabweichung des eigenen Fahrzeugs zur Spur und der Krümmungsverlauf der Fahrbahn ermittelt werden. Zur Lokalisierung von Objekten (ODT⁵⁵) in Videobildern werden oft auch 2D-Modelle oder Aspektgraphen eingesetzt. Dazu wird auf eine explizite Repräsentation der 3D-Form verzichtet und stattdessen Modelle verwendet, die direkt angeben, wie ein Objekt im Bild erscheint. So kann man, ohne eine Vorstellung über Art, Größe und Form des Objektes zu besitzen, jenes im Bild verfolgen. Der Einsatz von 2-D-Modellen ist eng verzahnt mit den Problemen der Mustererkennung. Häufig werden daher neben konventionellen Ansätzen auch neuronale Netze eingesetzt, die bereits zur Schriftenerkennung erfolgreich sind. *Bewegungs-basierte Verfahren* zur Erkennung von Objektentfernungen und -winkeln basieren auf dem optischen Fluss oder Bewegungstereo und werten nacheinander die von einer Kamera aufgenommenen Bilder aus. So spielt die Bewegung von Objekten bei der Entdeckung oftmals eine wichtige Rolle. Neben der Bewegung anderer Objekte führt auch die Eigenbewegung zum Informationsgewinn. Durch sie entsteht in einer aufgenommenen Bildsequenz eine Bewegung der Merkmale, die als optischer Fluss bezeichnet wird.

Ein Nachteil der beschriebenen Verfahren besteht darin, dass zur Rekonstruktion der 3-D-Umwelt stets nur die 2-D Information eines Bildes vorliegt. Um dieses Handicap zu überwinden, setzt man *stereobasierte Verfahren* ein, um aus den unterschiedlichen Projektionen durch Triangulation die Informationen über die Außenwelt und im Besonderen über Abstände zu gewinnen.

Tabelle 18: Bewertung von Mono- und Stereovideosensorik nach dem allgemeinem Fahrerassistenz-Kriterienkatalog

Kriterium	Mono- Videosensorik	Stereo- Videosensorik
Sensorreichweite	o	o
Öffnungswinkel	+	+
Messrate	+	+
Sensorsignalverarbeitung	- / - -	- -
Mehrzielfähigkeit	++ / +	++
Störfestigkeit	+	+
Kosten	+	-
Witterungsunabhängigkeit	-	o
Integrationsfähigkeit	o	-
Zulassungsfähigkeit	++	++
Diagnosefähigkeit	+	+
Kalibrieraufwand	o	-

⁵⁵ ODT steht für **O**bject **D**etection and **T**racking

Die Tabelle 18 zeigt die Bewertung einer Mono- und einer Stereovideosensorik anhand der Kriterien des allgemeinen FAS-Kriterienkatalogs. Die Stereolösung weist im Vergleich zu nur einer Kamera deutliche Nachteile auf, besonders im Hinblick auf die Integrationsfähigkeit und die Kosten. Zwei Kameras im ohnehin bereits design- und packagekritischen oberen Bereich der Frontscheibe zu integrieren, scheint zurzeit nicht möglich. Umweltbedingungen wie Regen, Nebel oder Schnee schränken die Erkennungssicherheit von Videosensoriksystemen drastisch ein. Zudem macht der hohe Kalibrieraufwand Lösungen notwendig, die sehr stark in den Produktions- und Fertigungsprozess der kamerabasierten Systeme eingreifen.

3.3.7 Sensordatenfusion

Systeme zur Fahrerassistenz erfassen das Fahrzeugumfeld und leiten aus den daraus gewonnenen Informationen Empfehlungen an den Fahrer ab. Es ist auch möglich, dass sie selbstständig einen Eingriff in den Fahrvorgang durchführen. Ein ausreichender Erfassungsbereich, gepaart mit hoher Robustheit sind deshalb zwingende Ansprüche, denen nur eine umfangreiche, vielseitige Sensorik gerecht werden kann. Um ein konsistentes Abbild der Verkehrsumgebung zu erhalten, müssen die Sensordaten mit geeigneten Verfahren in einer zentralen Instanz fusioniert werden [123].

Fusionierte Sensorinformationen können Vorteile bieten. Durch die elektronische Vernetzung können neue Funktionen umgesetzt werden. Gleichzeitig aber ist es möglich, bestehende Systeme hinsichtlich ihrer Robustheit zu verbessern und um weitere Teilfunktionen zu erweitern. Die Ziele der Sensorfusion liegen nach VUKOTICH & KIRCHNER in der Erhöhung ihrer Genauigkeit durch Fusion mehrerer Sensoren mit identischem Erfassungsbereich oder in der Erweiterung des Detektionsbereichs durch Fusion mehrerer Sensoren mit nicht überlappenden Erfassungsbereichen. Zusätzlich lassen sich Zuverlässigkeit (durch Verwendung mehrerer Sensoren) und Robustheit z.B. gegenüber Witterungsbedingungen (durch unterschiedliche Sensorprinzipien) erhöhen. Durch die Kombination verschiedener Sensoren werden neue Informationen erzeugt und durch die Verarbeitung der Sensordaten auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen die Informationsgewinnung verbessert. Durch die Fusion sehr divergierender Sensorquellen wird ein konsistentes Modell möglich. Daneben existierten auch wirtschaftliche und design-relevante Anforderungen, die durch die Sensorfusion berührt werden [123].

Das Ziel der Sensorfusion stellt ein Umfeldmodell dar, das objektorientiert aufgebaut ist. Für jedes Objekt stehen Informationen über den Bewegungszustand, die Abmessungen und den Zeitpunkt der Messung zur Verfügung. Dabei werden zudem allen Objektdaten Varianzen zugeordnet, die aus der Genauigkeit der einzelnen Sensoren ermittelt werden. Die in einem „Umfeldserver“ hinterlegten Objekte erlauben es den einzelnen Applikationen, auf die jeweils interessanten Sensorinformationen zuzugreifen. Bis zur Umsetzung einer solchen Lösung aber ist ein Paradigmenwechsel notwendig, die Sensorauswahl darf nicht mehr applikationsspezifisch vorangetrieben werden, sondern die Wiederverwendbar-

keit der Sensorinformationen und die Eignung zur Einbindung in ein solches Fusionsmodell müssen im Vordergrund stehen. Die Einsparung durch Vermeidung redundanter Entwicklungskosten wiegt dann auch die Einstiegs- bzw. Umsetzungskosten zur Realisierung eines solchen Sensordatencontainers auf.

3.3.8 Sensortopologie für einen Querführungsassistenten

Die Anforderungen des Querführungsassistenten finden in die Kriterien des bereits vorgestellten speziellen QFA-Kriterienkatalog Eingang. Im Rahmen der Befragung sollten die einzelnen Sensortechnologien anhand dieser Kriterien bewertet werden. Das Ergebnis zeigt die Tabelle 19.

Tabelle 19: Bewertung verschiedener Sensortechnologien nach dem speziellen QFA-Kriterienkatalog

Kriterium	77-GHz-Radar	24-GHz-UWB-Radar	24-GHz-CW-Radar	Multibeam-laser	Laser-scanner	Mono-Video-sensorik	Stereo-Video-sensorik
Relativgeschwindigkeit	++	++ / +	++	+	o	o	o
Lage und Abstand	++ / +	++	++	+	++ / +	-	o / -
Fahrspurerkennung	--	ungen.	ungen.	--	-	++	++
Fahrspurzuordnung	--	--	--	--	--	+	+
Objektklassifizierung	--	--	--	-	-	++	++
Objektausdehnung	ungen.	--	--	o / -	+	+	+
Unterscheidungsfähigkeit	o	--	-	o	o	+	+
Sensorfusion	++ / +	+	+	+ / o	+	+	+
Geschwindigkeitsunabhängigkeit	+	++	+	++	++	+	+

Um die Position des eigenen Fahrzeugs in der Fahrspur zu bestimmen, ist das Wissen um die Spurmarkierungen und deren Verlauf essentiell. Wie die Bewertung durch die Experten zeigt, kann dies auf dem aktuellen Stand der Technik nur durch Auswertung eines Videobildes geschehen, wenn einem die Information auch in Vorausschau zu Verfügung stehen soll. Der Einsatz von Bildverarbeitungssystemen in Systemen der aktiven Sicherheit ist in zahlreichen Quellen beschrieben [23] [7]. Videosensoren mit Bildverarbeitung sind die einzig bekannten Sensoren, die den Fahrspurverlauf detektieren können [106]. So ist es auch möglich, die eigene Fahrspur und die Position des Fahrzeugs relativ zum Rand der Fahrspur zu ermitteln. Dazu kommen eine gute Winkeltrennfähigkeit und Winkelmessgenauigkeit, was letztendlich zu einer hohen Güte der Spurzuordnung führt. Eine ausreichende Spurzuordnung ist mit Radar oder auch mit Lidar prinzipiell nicht möglich. Beide sehen nur Reflexzentren, die an beliebiger Stelle auf dem Zielfahrzeug liegen können. Benötigt wird aber die Lage der Objektkanten, die nur mittels einer Videosensorik detektiert werden

kann. Dies gilt natürlich auch für die Fähigkeit, die erkannten Ziele nach ihrem Typ zu klassifizieren. Die Verwendung einer Videosensorik ist demnach eine zwingende Voraussetzung, um die Systemziele des Querführungsassistenten erreichen zu können. Die Befragung zeigt, dass zwischen der Mono- und der Stereolösung nur geringe Unterschiede in der Leistungsfähigkeit bestehen. Da eine Stereolösung quasi räumliches Sehen erlaubt, ergeben sich Vorteile durch eine bessere Abschätzung des Abstands und marginale Verbesserungen in der Klassifizierung von Fremdobjekten. Durch die größere Datenmenge der Stereolösung ist eine komplexere Sensordatenverarbeitung notwendig. Die ohnehin schon aufwändige Kalibrierung wird um eine deutlich schlechtere Integrationsfähigkeit ergänzt. Die Kameras müssen, um gute Ergebnisse zu erzielen, in einem deutlichen Abstand voneinander montiert sein. Zwei Kameras beispielsweise im Bereich des oberen Bereichs der Frontscheibe zu platzieren, scheint aus Platz- und Designgründen kritisch. Eine Mono-Videosensorik ist nach Abschätzung aller zugrunde gelegten Bewertungskriterien die erste Wahl. Die Vorteile einer Stereokamera sind bei der Umsetzung eines Querführungsassistenten vernachlässigbar, da die grundlegenden Systemziele davon nicht maßgeblich positiv beeinflusst werden.

Bei Verwendung von drei Chips und entsprechenden Filtern ist eine Farbdarstellung möglich. In natürlichen Umgebungen können viele Objekte durch ihre Farbe unterschieden werden, zum Beispiel ein matschiger Feldweg und die angrenzende nasse Wiese an einem Regentag, die in einem monochromen Bild nicht voneinander zu unterscheiden wären [20]. In einer farbigen Umgebung kann das Fehlen von Farbe bei bekannterweise unbunten Objekten wie asphaltierten Straßen oder geschotterten Feldwegen zur Identifizierung dieser Objekte dienen. Grundsätzlich kann es damit von Vorteil sein, wenn ein technisches Wahrnehmungssystem Farben unterscheiden kann. Jedoch erhöht sich die Datenmenge um das Dreifache und die Komplexität der Bildverarbeitung steigt nochmals. Zudem arbeiten diese Algorithmen noch nicht zuverlässig.

Eine Überwachung des Fahrzeugumfeldes stellt im Wesentlichen zwei Grundanforderungen an die eingesetzte Sensorik. Zum einen ist eine möglichst frühzeitige Erkennung von Objekten notwendig. Dies stellt besonders bei höheren Eigen- bzw. Relativgeschwindigkeiten hohe Anforderungen an die Reichweite der eingesetzten Sensoren. Zum anderen ist es notwendig, eine hinreichend gute Unterscheidung unterschiedlicher Objekte zu gewährleisten. Somit ergibt sich die Anforderung an eine gute Entfernungsauflösung der Sensorik im Nahbereich.

Radare sind in der Lage, Abstand und Relativgeschwindigkeit eines Objektes exakt zu bestimmen. Je nach Auflösungs- und Trennvermögen können dabei mehrere Ziele gleichzeitig erfasst werden. Im Gegensatz dazu ist aber die Bestimmung der Seitenablage oder der Objektausdehnung stark fehlerbehaftet, da die Objekte als Punktbewegungen eines Reflexionszentrums repräsentiert sind. Das Reflexionszentrum kann dabei zufällig und auch über die Zeit nicht konstant überall auf dem Fremdobjekt (z.B. Radkasten, Kennzeichen) liegen. Die Auswahl der Radartechnologie ist aus den Systemzielen möglich. Im

hinteren Bereich des Fahrzeugs ist eine Erkennung von Fremdfahrzeugen und deren Annäherungsparameter notwendig. Neben der Reichweite ist der Öffnungswinkel des Sensors entscheidend. Radare auf 77 GHz Basis können hier die Funktionalität nicht zufrieden stellend sicherstellen, da ihr schmaler Öffnungswinkel keine gesamtheitliche Überwachung des hinteren und seitlichen Fahrzeugumfeldes erlaubt. Der Einsatz von Radaren auf 24 GHz Basis ist deshalb notwendig. Diese sind in der Lage mit einer Minimalanzahl von Einzelsensoren aufgrund ihres großen Öffnungswinkels den relevanten Bereich zu überwachen. Da aber ohne zusätzliche Maßnahmen keinerlei Entscheidung über Spurverteilung und Spurzuordnung fremder, erkannter Objekte getroffen werden kann, und sie häufig auch Objekte außerhalb der Fahrbahn als Hindernis erfassen, sind sie nur als partieller Bestandteil in einer Sensorplattform denkbar und erlangen erst in einer Kombination mit passiven Sensoren die für die Massenanwendung erforderliche Robustheit und Zuverlässigkeit.

Bei der Verwendung der Lidartechnologie sind zahlreiche Veränderungen am Fahrzeug notwendig. Besonders die Fragen zu Design und Integration können nicht zufrieden stellend beantwortet werden. Trotz ihrer Leistungsfähigkeit besonders hinsichtlich der Erfassungsparameter und Klassifizierungsparameter von Fremdobjekten ist ihre Verwendung in einer seriennahen Sensortopologie nicht möglich.

Bild 38 zeigt die Leistungsfähigkeit einer Sensortopologie, die unter Einbeziehung einer Mono-Videosensorik nach vorne und einer 24 GHz-CW-Radarlösung bei Verwendung in einem Querführungsassistenten realisiert werden könnte. Es wird ersichtlich, dass die Anforderungen, die an die Sensorik des Querführungsassistenten gestellt werden, von dieser Lösung zufrieden stellend erfüllt werden können.

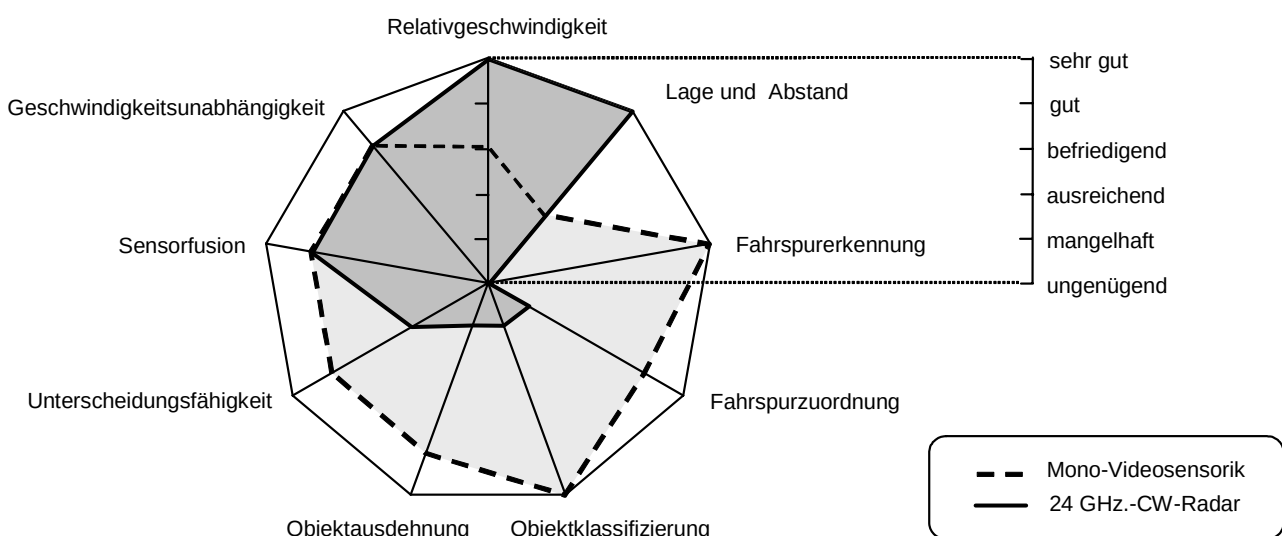


Bild 38: Eignung einer auf Mono-Videosensorik und 24 GHz.-CW-Radar beruhenden Sensorplattform für einen Querführungsassistenten

3.3.9 Diskussion

Die Expertenbefragung beschreibt eine Methode, um die Meinung eines einzelnen Entwicklers, die oft genug die Systemgestaltung bestimmt, zu objektivieren. Im Rahmen von Gesprächen mit Experten und mit Hilfe eines Fragebogens konnte zum einen die Bewertungsgrundlage für verschiedene Sensortechniken geschaffen werden. Ein allgemeiner FAS-Kriterienkatalog bildet all die Anforderungen ab, die ein Sensor bei Verwendung in einem Fahrerassistenzsystem erfüllen muss. Ein spezieller QFA-Kriterienkatalog dient nun dazu, die systemtypischen Anforderungen des Querführungsassistenten zu formulieren und als Bewertungskriterien offen zu legen. In einem nächsten Schritt wurden verschiedene, am Markt verfügbare Sensortechnologien anhand dieser Bewertungskataloge beurteilt. Ein sensorindividuelles Stärken-Schwächen-Profil ist das Ergebnis. Bei näherer Betrachtung zeigt sich, dass eine Sensortopologie aus Videosensorik und Mittelbereich-Radarsensoren zur Sicherstellung der Systemfunktionalität des Querführungsassistenten am besten geeignet scheint. Dieser Vorschlag wurde beim Aufbau des Versuchsträgers, wie er in Kapitel 5 beschrieben wird, berücksichtigt.

3.4 Zusammenfassung

Die vorstehenden Ausführungen des Kapitels 3 zeigen zahlreiche Sachverhalte auf, die im Rahmen dreier aufwändiger Untersuchungen des Autors der vorliegenden Arbeit gewonnen werden konnten.

Die Unfalldatenanalyse ergab, dass Unfälle in der Querführung, die auf Fehler bei Spurhaltung und Spurwechsel zurückgehen, einen deutlichen Anteil am gesamten Unfallgeschehen aufweisen. Spurwechselunfälle finden vor allem auf Autobahnen statt, während Spurverlassensunfälle, auf Land- und Kreisstraßen am häufigsten zu Verletzten und Toten führen. Die Auswertung der GIDAS-Datenbank ergab zudem zahlreiche Merkmale, die die querführungsrelevanten Unfälle charakterisieren und sie vom durchschnittlichen Unfallereignis unterscheiden. Das Risiko, bei einem Spurverlassens- sowie bei einem Spurwechselunfall tödlich zu verunglücken ist im Vergleich zu den übrigen Unfällen deutlich erhöht, ein Querführungsassistent, der den Fahrer in Spurhalte- wie Spurwechselmanövern unterstützt, weist damit ein großes Wirkungsfeld auf und kann auf gesamtdeutscher Ebene bis zu 70.000 Unfälle, die außerorts auf Landstraßen und Autobahnen geschehen, potentiell beeinflussen.

Eine Multimediabefragung liefert ergänzend dazu nun erste Anhaltspunkte darüber, wie sich die Präferenz potentieller Kunden in Bezug auf charakteristische Merkmale beispielsweise bezüglich der Systemaktivierung, der Mensch-Maschine-Schnittstelle und des Verkaufspreises darstellt. Eine Spezifikation des Querführungsassistenten muss anhand dieser Merkmale erfolgen, folgt man den Ansätzen zur fahrerzentrierten Entwicklung und benutzergerechten Auslegung des Systems. Mit Hilfe der Multimediabefragung können eini-

ge Fragen hinsichtlich der Systemspezifikation bereits in einem frühen Stadium der Produktentwicklung geklärt werden, auch ohne dass bereits ein Versuchsträger oder andere Versuchsaufbauten für Kundenbefragungen und Versuche verfügbar sind. Deutlich zeigt diese Art von Befragung auch ihre Grenzen, eine realitätsnahe Einschätzung beispielsweise der Mensch-Maschine-Schnittstelle oder der Preisbereitschaft der Kunden ist nur beschränkt möglich und muss in ergänzenden, realitätsnäheren Versuchreihen validiert werden.

Die Expertenbefragung zur Sensorarchitektur des Querführungsassistenten stellt einen ersten Schritt dar, die mit Hilfe unterschiedlicher Analysemethoden gewonnenen, vielfältigen Anforderungen aller Beteiligten in eine technische Lösung zu übersetzen. Als Ergebnis stehen nun zwei Bewertungskataloge zur Verfügung, die die Anforderungen an Sensoren einerseits bei Verwendung in Applikationen der Fahrerassistenz im Speziellen und andererseits bei Verwendung in einem Querführungsassistenten beschreiben. Diese Zielsysteme wurde mit den aktuell verfügbaren Sensortechnologien verglichen, um so eine Lösung für die Sensorarchitektur des Querführungsassistenten gewinnen zu können. Diese sieht nun eine Kombination aus Mono-Videosensorik und einer 24 GHz.-CW-Radarlösung vor.

4 Auslegung der Mensch-Maschine-Schnittstelle

Bereits heute ist durch die hohe Verkehrsdichte und –Komplexität und durch neuartige Systeme im Fahrzeug (z.B. Navigationssysteme oder Multimediakomponenten) der visuelle Sinneskanal des Fahrers weitgehend aus- bzw. überlastet. Heute besteht eine Übervisualisierung der Interaktion mit technischen Systemen. Dieses Kapitel zeigt, dass im Vergleich bestimmter Signale, die auf den menschlichen Informationskanälen transportiert werden, für den Querführungsassistenten unterschiedliche gut geeignet sind, da der Reiz-Reaktions-Mechanismus in unterschiedlicher Dauer vollzogen werden kann. Gerade der haptischen Informationsübertragung (z.B. durch synthetische Lenkmomente) kommt aus diesem Grund bei Fahrerassistenzsystemen eine besondere Bedeutung zu [16]. In den folgenden Ausführungen soll deshalb anhand eines bei der AUDI AG durchgeführten und in der Arbeit von MANN & POPKEN veröffentlichten Simulatorversuchs speziell auf die mögliche Verwendung verschiedener Signale in einem Querführungsassistenten eingegangen werden [67].

4.1 Menschliche Informationskanäle

Die Betrachtung des Standes der Technik aus Kapitel 2.4.6 zeigt, dass zum heutigen Stand bei Anwendungen der Fahrerassistenz, die der Unterstützung des Fahrers bei Spurhaltung und Spurwechsel dienen, kein einheitliches Verständnis darüber erreicht ist, auf welchen menschlichen Kanälen die Signale transportiert werden sollen, die zum Abbruch eines Spurwechsels oder zur Verhinderung eines ungewollten Abkommens aus der Fahrspur führen sollen. Die bisherige theoretische Betrachtung soll nun um einen praktischen Ansatz ergänzt werden. Nach einer kurzen theoretischen Einführung zur Charakteristik menschlicher Informationskanäle soll die Beschreibung und Interpretation eines Simulatorversuches zeigen, welche Signale zur Verwendung in einem Querführungsassistenten geeignet sind.

4.1.1 Überblick

Informationen können auf vielerlei Wegen in das Bewusstsein des menschlichen Fahrers gelangen. Der Mensch hat zahlreiche Möglichkeiten, über die körpereigenen Sensoren Signale aufzunehmen und anschließend in den verarbeitenden Einheiten in Rückenmark und Gehirn in eine motorische Reaktion umzusetzen. Der Reiz ist die Zustandsänderung (bzw. Zustand) im Außenmilieu oder im Körperinneren, die bei Einwirken auf erregbare Strukturen eine Erregung oder Erregbarkeitsänderung hervorruft (Reizung, Reaktion). Für die Fahrzeugführung sind die in Tabelle 20 aufgeführten Rezeptorsysteme und Reize relevant [10].

Tabelle 20: Systematisierung menschlicher Rezeptorsysteme mit Bedeutung für die Kraftfahrzeugführung

Rezeptorsystem	Reize	Ort der Rezeptoren (Organe)
Visuelles Rezeptorsystem	Elektromagnetische Strahlung im Wellenlängenbereich von 400-720 nm	Netzhaut im Auge
Auditives Rezeptorsystem	Luftdruckschwankungen mit Frequenzen von 20 bis 20.000 Hz	Äußeres Ohr, Mittelohr
Vestibuläres Rezeptorsystem	Beschleunigungen	Vestibulärapparat im Innenohrbereich
Taktils Rezeptorsystem	Berührungen und Verformungen der Haut	Mechanorezeptoren in der Haut und dem darunter liegenden Gewebe
Propriozeptives (kinästhetisches) Rezeptorsystem	Dehnungen der Muskel und Bänder; Bewegungen der Gelenke	Rezeptoren an den Muskelspindeln. im Bereich der Gelenke und in den Bändern

Bei der Fahrzeugführung sind der Sehsinn, der Hörsinn, der Gleichgewichtssinn, der Tast- bzw. Hautsinn und der Stellsinn und der Kraftsinn relevant. Über diese nimmt der Fahrer Informationen über den Fahrzeugzustand und die Umwelt auf [110]. Diese Informationen werden zu einer konsistenten, internen Repräsentation des Fahrzeugs und der Umwelt herangezogen. Dabei kann vermutet werden, dass der Mensch teilweise mehrere Sinne benutzt, um ein bestimmtes Merkmal dieser internen Repräsentation qualitativ oder quantitativ zu bestimmen. Erst das Zusammenspiel all dieser Sinneskanäle vermittelt trotz der unterschiedlichen Charakteristik und Leistungsfähigkeit das Erleben der eigenen Bewegung mit dem Fahrzeug im Raum.

Für alle Wahrnehmungsvorgänge existieren Schwellen, unterhalb derer ein Reiz nicht mehr wahrgenommen werden kann. Daneben ist noch die Unterschiedsschwelle bedeutend, die angibt, wie groß die Differenz zwischen zwei unterschiedlich starken Reizen sein muss, damit sie auch als unterschiedlich wahrgenommen werden. Der Fahrer ist in der Lage, für das eigene Fahrzeug die Position, die Geschwindigkeit und Beschleunigung in Fahrtrichtung und quer dazu, sowie die Gierwinkelgeschwindigkeit und die Gierwinkelbeschleunigung wahrzunehmen [110]. Die Reizschwelle für Beschleunigungen liegt zwischen 0,01 g und 0,02 g [14]. Die Längsgeschwindigkeit wird auf der einen Seite unter Mithilfe des Tachos wahrgenommen. Sie kann aber auch über die Fahrgeräusche, das kinästhetische und das optische Empfinden auf ± 10 km/h genau geschätzt werden [14]. Aufgrund seines visuellen Eindrucks kann der Fahrer Querpositionen oberhalb von 0,15 m und Quergeschwindigkeiten oberhalb von 0,11 m/s unterscheiden [40]. Der Abstand zu anderen Fahrzeugen wird nur ungenau wahrgenommen. HÄKKINEN zeigte bereits 1974, dass Entfernungen von vorausfahrenden Fahrzeugen bis 50 m noch recht genau geschätzt werden können, während oberhalb von 50 m der Abstand zu einem anderen Fahrzeug immer stärker überschätzt wird [47]. Relativgeschwindigkeiten anderer Verkehrsteilnehmer kann der Fahrer aus Winkeländerungen wahrnehmen. Dabei existiert allerdings eine

Schwelle in Abhängigkeit von der Größe des Vorderfahrzeuges und dessen Abstand, unterhalb dieser Relativgeschwindigkeiten nicht mehr wahrgenommen werden [127].

Eine sichere Schätzung von Relativgeschwindigkeit und Abstand anderer Verkehrsteilnehmer würde gefahrenlose Spurwechsel sicherstellen. Besonders bei Spurwechselmanövern führen Fehleinschätzungen dieser Größen zu Gefahrensituationen. Aus diesem Grund wird zur Herleitung der Warnstrategie des Querführungsassistenten auf die Kritikalitätsbeurteilung menschlicher Fahrer beim Spurwechsel in Abschnitt 6.2.1.2 gesondert eingegangen. Im Folgenden soll die Charakteristik der für die Fahrzeugführung wichtigsten menschlichen Informationskanäle näher betrachtet werden. Anschließend soll ein Simulatorversuch klären, welcher Signaltyp zur Warnung in querführenden Fahrmanövern zu einer schnellen und richtigen Reaktion des Fahrers führt.

4.1.2 Charakteristik

Der visuelle Kanal stellt in der Fahrzeugführung den dominanten Kanal dar. Er ist dabei der einzige menschliche Informationskanal, ohne den die Fahrzeugführung nicht möglich wäre. Gleichzeitig aber stellt er den differenziertesten und mächtigsten Kanal dar. Über ihn fließen mehr als 90% aller Informationen. Der Mensch ist in der Lage, über den visuellen Kanal 3,5 Mio. Bit/s aufzunehmen [8]. Besonders deutlich wird die Bedeutung des visuellen Kanals, wenn beispielsweise im dichten Nebel nahezu keine Informationen über Straßenrand, (Relativ)- Geschwindigkeit und Sichtweite vorliegen.

Die Informationsaufnahmekapazität des auditiven Kanals ist im Vergleich zum visuellen Kanal gering. Sie beträgt rund 8.000 bit/s und somit nur 0,23% der Kapazität des optischen Kanals [8]. Er spielt aber in Verbindung mit den optisch vermittelten Informationen eine herausragende Bedeutung in der Geschwindigkeitswahrnehmung. BIELACZEK bemerkt, dass dieser Kanal augenblicklich bis auf wenige Ausnahmen (Verkehrsfunk, Blinkerticken, Licht- und Geschwindigkeitwarner, Motorengeräusch, Reifengeräusche bei Kurvenfahrt oder bei starken Bremsmanövern) wenig genutzt wird, so dass er in Zukunft über akustische Anzeigen stärker miteinbezogen werden sollte [8].

Bei taktilen Informationen (Haut- und Tastsinn) handelt es sich um das Erfühlen von Vibrationen, Wärme und Oberflächen von Gegenständen. Taktile Informationen sind Teil der haptischen Wahrnehmung. Mit ihr kann der Organismus die Form und Oberflächenkonsistenz von berührten Objekten erfassen. Dafür werden die Informationen aus den Stellungsrezeptoren in Muskeln und Gelenken (speziell der Finger), den Mechanorezeptoren in der Haut und den Thermorezeptoren in der Hautoberfläche in adäquater Weise miteinander verrechnet [13].

Innerhalb der Wahrnehmungsprozesse während der Fahrzeugführung sind auch das haptische und das vestibuläre System intensiv beteiligt. Es gibt nachhaltige Bemühungen, vor allem das visuelle Rezeptorsystem zu entlasten und den haptischen bzw. kinästhetischen

Sinn aktiv in die Informationszirkulation zu integrieren. Zahlreiche Untersuchungen zeigen, dass haptische Signale in der Lage sind, den Fahrer bei Vorliegen einer Querverföhrungsgeföhrdung zu warnen und ihn durch Lenkmomente oder Lenkradvibration beispielsweise zum Abbruch eines kritischen Spurwechselmanövers zu bewegen (siehe Kap. 2.4.6.1)

Die haptische Übertragung von Informationen durch synthetische Lenkmomente hat den großen Vorteil, dass nach einem mehr oder weniger langen Lernprozess ein Regelkreis erzielt werden kann, der im Wesentlichen unterbewusst und reflexartig abläuft. Da sich sowohl die Rezeptoren für die Wahrnehmung als auch die Effektoren zur Erzeugung der Stellgröße als Reaktion auf die Information in den Armmuskeln befinden, ist dieser sensomotorische Kurzschluss zwischen Rezeptoren und Effektoren leichter herzustellen als zwischen einer visuellen bzw. vestibulären Wahrnehmung und den Effektoren. Dieser sensormotorische Kurzschluss zwischen Rezeptoren und Effektoren wird als Reiz-Reaktions-Mechanismus bezeichnet [16]. Ein haptisches Warnsignal kann von den Fahrern ohne zusätzlichen Interpretationsbedarf auf höherer kognitiver Ebene reflexartig in eine Korrekturaktion umgesetzt werden. Zudem ist der Mensch in der Lage, seine internen Regelparameter sehr schnell an die Randbedingungen anzupassen und die Lenkmomentinformation auch ohne zusätzliche visuelle Rückmeldung zu verarbeiten.

Lenkmomente bieten zudem den Vorteil, dass sie eine Richtungsinformation beinhalten, die dem Fahrer die richtige Lenkreaktion zur Abwendung der Geföhrdung und Auflösung der kritischen Situation vorgeben kann. Das Lenkmoment wirkt dabei von der Gefahr, z.B. der Fahrspurbegrenzung, weg hin zur Fahrbahnmitte. Bei taktilen Warnungen über Lenkradvibration wird in der Regel keine Richtungsinformation im Sinne einer Handlungsanweisung an den Fahrer übermittelt. Trotzdem scheinen sie aufgrund eines ähnlich kurzen Reiz-Reaktions-Mechanismus' für die Mensch-Maschine-Schnittstelle eines Querverföhrungsassistenten geeignet. Sie bieten -wie synthetische Lenkmomente auch- den Vorteil, dass sie unbemerkt vom Beifahrer erfolgen und damit durch die Vermeidung der Bloßstellung des Fahrers, die Akzeptanz und die Zufriedenheit mit dem System positiv beeinflussen können.

4.2 Simulatorversuch zu Informationskanälen

Der Mensch verfügt zur Aufnahme von Informationen über verschiedene Sinnesorgane, die bei der Fahrzeugführung in unterschiedlichem Maße genutzt werden. Das Wissen um die Leistungsföhrigkeit der verschiedenen menschlichen Sinneskanäle, ihre Beanspruchung durch die Herausforderungen der Fahrzeugführung und ihre Verwendung durch den Fahrer ist mit Blick auf das in dieser Arbeit vorgestellte Fahrerassistenzsystem essentiell. Die Informationsdarbietung des Systems muss optimal angepasst und die richtige Interpretation der Systemrückmeldung durch den Fahrer jederzeit sichergestellt sein. Eine schnelle Reaktion auf die dargebotenen Signale ist gerade bei den in dieser Arbeit thematisierten Systemen zur Unterstützung in der Querverföhrung notwendig, da das Zeitfenster, in

dem eine kritische Situation durch den Fahrer bereinigt werden kann, ohne dass es zu einem Unfall kommt, meist sehr klein ist, da neben der rechtzeitigen Erkennung der Situation durch das System die Reaktionszeit des Fahrers besonders ins Gewicht fällt.

4.2.1 Versuchsziel

Die nachfolgend beschriebene Untersuchung von MANN & POPKEN liefert grundlegende Anhaltspunkte bei der Auswahl und Gestaltung der Fahrer-System-Schnittstelle des Quersführungsassistenten [67]. Dazu wurden verschiedene Arten von Signalen untereinander verglichen. Der Versuch zeigt, welches Signal eine möglichst schnelle, korrigierende Reaktion des Fahrers am Lenkrad hervorrufen kann. Als Signale kamen ein Warnton, die Vibration des Fahrersitzes, eine Lenkradvibration und Lenkmomente zum Einsatz. Die Hypothesen, deren Gültigkeit im Rahmen dieses Versuchs überprüft wurde, lauten wie folgt:

Hypothese 4.2-1: Die Art des Signals (akustisches Signal, Lenkradvibration, Sitzvibration, Lenkmoment) hat einen Einfluss auf die Reaktionszeiten.

Diese Hypothese sollte zudem in Situationen mit hoher Fahrerbeanspruchung untersucht werden. Normalerweise lenkt ein Fahrzeugführer seine Aufmerksamkeit auf die Fahraufgabe und/oder auf die Abarbeitung nachgeordneter sekundärer und tertiärer Aufgaben. Damit ist eine Veränderung der Reaktionszeiten auf Signale eines Fahrerassistenzsystems zu erwarten.

Hypothese 4.2-2: Eine Zusatzaufgabe verändert die Reaktionszeiten erheblich.

Hypothese 4.2-3: Das Verhältnis der Reaktionszeiten zwischen den einzelnen Signalarten bleibt mit und ohne Zusatzaufgabe gleich.

Verschiedene Fahrer weisen eine unterschiedliche Leistungsfähigkeit auf. Deshalb sind Unterschiede zwischen den einzelnen Fahrern zu erwarten. Zur Überprüfung diene deshalb folgende Hypothese:

Hypothese 4.2-4: Zwischen den einzelnen Versuchspersonen ergeben sich in Bezug auf die Reaktionszeiten erhebliche Unterschiede.

4.2.2 Versuchsmethode

Die Reaktion, mit der der Fahrer kritische Situationen in querführenden Fahrmanövern auflösen muss, erfordert eine Lenkkorrektur. Die Versuchsaufgabe bestand daher darin, mit einer Lenkbewegung so schnell wie möglich auf die unterschiedlichen, dargebotenen Signale zu reagieren. Gemessen wurde die Reaktionszeit der Probanden. Die Ausprägung der einzelnen Signaltypen wurde nicht variiert, sondern im Rahmen von Vorversuchen und

deren Auswertung durch Experten auf jeweils eine über den Versuch konstante Signalcharakteristik festgelegt. Die Signalstärke wurde im Vorfeld der einzelnen Versuchssitzungen so auf die betreffende Versuchsperson abgestimmt, dass diese das Signal mit Sicherheit erkennen konnte. Um eine Veränderung der Reaktionszeiten auch in Beanspruchungssituationen feststellen zu können, wurde die Stichprobe zufällig in zwei gleich große Gruppen geteilt. Die erste Gruppe (nachfolgend „Gruppe mit Nebenaufgabe“ genannt) sollte auf die Signale mit einer Lenkbewegung reagieren und gleichzeitig eine Nebenaufgabe bearbeiten. Die Nebenaufgabe sollte eine Ablenkung durch die Fahraufgabe simulieren. Die zweite Gruppe („Gruppe ohne Nebenaufgabe“) sollte ebenfalls mit einer Lenkbewegung auf die Signaldarbietung reagieren, musste aber keine Nebenaufgabe bearbeiten.

4.2.3 Versuchspersonen

An der Untersuchung nahmen insgesamt 26 Mitarbeiter (22 Männer, 4 Frauen) verschiedener Organisationseinheiten der AUDI AG teil. Die Versuchspersonen wurden zufällig ausgewählt.

4.2.4 Versuchsdurchführung

Der Versuch wurde an einem Simulator der AUDI AG durchgeführt (siehe Bild 39). Dieser war mit einer Lenkradaktuatorik ausgerüstet, die es ermöglichte, sowohl Lenk- als auch Vibrationsmomente auf das Lenkrad aufzubringen. Über Lautsprecher wurden die akustischen Signale übermittelt. Die Vibration des Sitzes erfolgte durch eigens eingebrachte Vibrationselemente in der Sitzfläche des Simulatorsitzes.



Bild 39: Fahrsimulator

Die vier verschiedenen Signaltypen wurden den einzelnen Versuchsteilnehmern jeweils über 100 Mal in zufälliger Reihenfolge dargeboten. Auf jede Signaldarbietung sollte der Versuchsteilnehmer so schnell wie möglich mit einer Lenkbewegung reagieren. Die mini-

male Auslenkung musste größer als 7 Grad sein. Die Zeit zwischen den einzelnen Signalen variierte zufällig und betrug zwischen 8 und 12 Sekunden.

Auf der vor dem Simulator angebrachten Leinwand wurden in zufälliger Abfolge Ziffern von 1 bis 9 dargestellt. Gleichzeitig zur Reaktion auf die vier Signale hatten die Teilnehmer der Gruppe mit Nebenaufgabe die Aufgabe, beim Erkennen der Ziffer „5“ auf der Leinwand die Bremse zu betätigen. Bei Darstellung anderer Ziffern wurde von den Versuchspersonen keine Bremsreaktion verlangt. Die Wechselfrequenz der Ziffern betrug 0,7 Hz. Dieser Wert wurde im Rahmen des Vorversuchs erarbeitet. Inwieweit die Probanden die Nebenaufgabe fehlerfrei bearbeiteten, wurde nicht ausgewertet. Sie diente ausschließlich zur Simulation der Fahraufgabe und zur Erhöhung der Probandenbeanspruchung.

4.2.5 Versuchsauswertung

Bei geringen Datenmengen können Extremwerte das Ergebnis verfälschen, indem sie den Mittelwert künstlich vergrößern oder verkleinern. Daher wurden die so genannten Ausreißerwerte mit „Box-Plots“ ermittelt und aus dem Datensatz entfernt. Diese Werte kamen im Versuch beispielsweise durch eine Reaktion der Probanden mit einer Brems- statt mit einer Lenkbewegung auf ein Warnsignal zustande. Zudem kam es in seltenen Fällen vor, dass Versuchspersonen zuerst auf eine „5“ statt auf ein Signal reagierten und so durch eine falsche Priorisierung der Aufgaben unrealistisch lange Reaktionszeiten induzierten.

Die Daten aller Probanden wurden mit Hilfe eines Statistikprogramms ausgewertet. Zum Vergleich der Teilnehmer und Gruppen wurden jeweils die Mittelwerte pro Signal berechnet. Anschließend konnte so überprüft werden, ob die Unterschiede der Reaktionszeiten auf die verschiedenen Signale pro Gruppe signifikant sind (Hypothese 4.2-1) und ob sich die Gruppen hinsichtlich ihrer Reaktionszeit unterscheiden (Hypothese 4.2-2).

4.2.6 Versuchsergebnisse

Nach Auswertung der gültigen Daten zeigte sich das in Bild 40 und Bild 41 dargestellte Ergebnis. Die Darstellungen geben für die vier Signale Warnton, Sitzvibration, Lenkradvibration und Lenkmoment die Mittelwerte und die Standardabweichung der Reaktionszeiten, einmal für die Gruppe mit Nebenaufgabe und einmal für die Gruppe ohne Nebenaufgabe an.

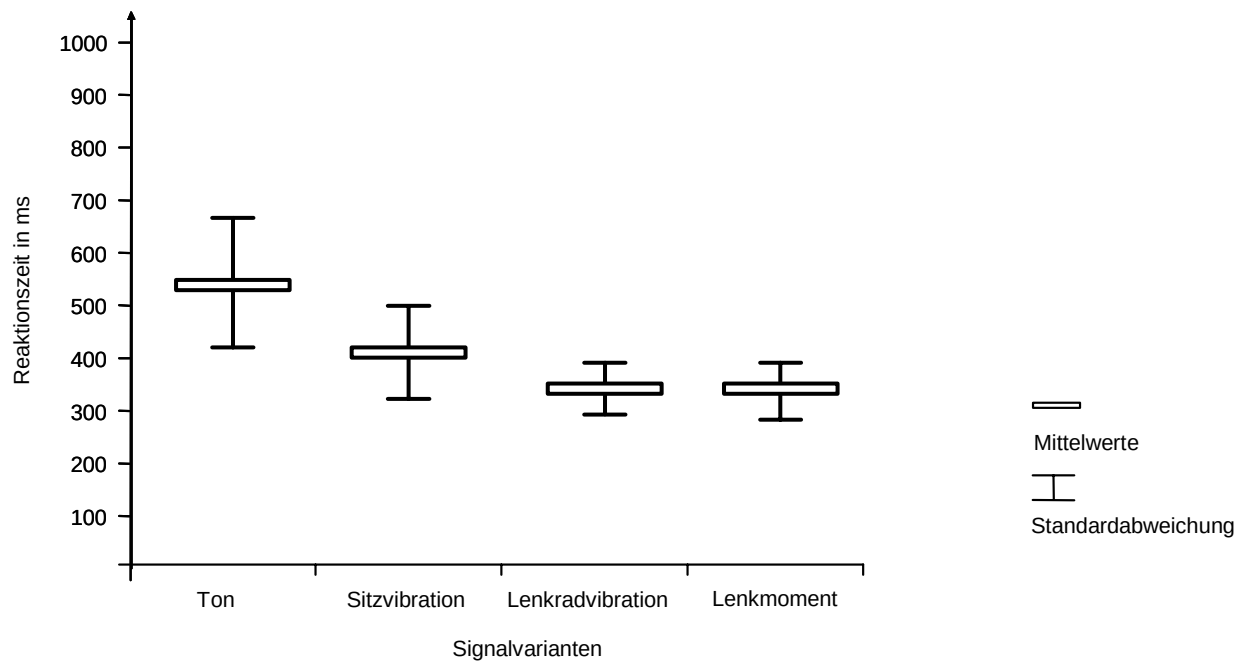


Bild 40: Ergebnisse zur durchschnittlichen Reaktionszeit auf Warnton, Sitzvibration, Lenkradvibration und Lenkmoment der Gruppe ohne Nebenaufgabe

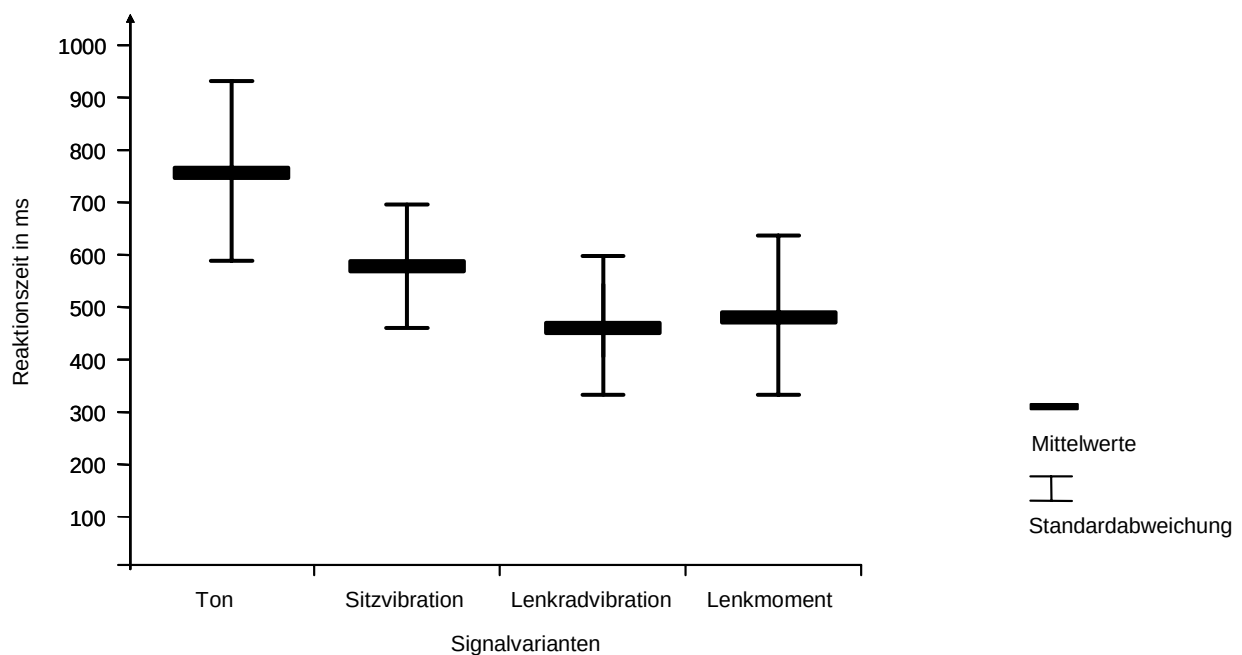


Bild 41: Ergebnisse zur durchschnittlichen Reaktionszeit auf Warnton, Sitzvibration, Lenkradvibration und Lenkmoment der Gruppe mit Nebenaufgabe

Es kann nachgewiesen werden, dass sich die Reaktionszeiten zwischen den beiden Gruppen unterscheiden. Die Nebenaufgabe erhöht die Reaktionszeit unabhängig vom

Warnsignal höchst signifikant⁵⁶. Da diese Erhöhung unabhängig vom Warnsignal konsistent erfolgt, kann auch Hypothese 4.2-3 bestätigt werden.

Vergleicht man die Reaktionszeiten auf die vier verschiedenen Signale, so unterscheiden sie sich innerhalb beider Gruppen signifikant. Lenkradvibration und Lenkmoment führen in der Gruppe ohne Nebenaufgabe mit einem Mittelwert um 330 ms zu einer bis zu eineinhalbmal schnelleren Reaktion am Lenkrad im Vergleich zum Warnton und die Sitzvibration mit Mittelwerten von 530 ms und 410 ms. Auch innerhalb der Gruppe mit Nebenaufgabe sind unterschiedliche Reaktionszeiten auf die Signaldarbietung festzustellen. Die Signale am Lenkrad haben mit Mittelwerten von 460 ms für die Vibration und 490 ms für das Lenkmoment wie in der Gruppe ohne Nebenaufgabe auch besonders im Vergleich zum akustischen Signal mit einem Mittelwert von 760 ms einen deutlichen Zeitgewinn bis zur Lenkradbetätigung zur Folge.

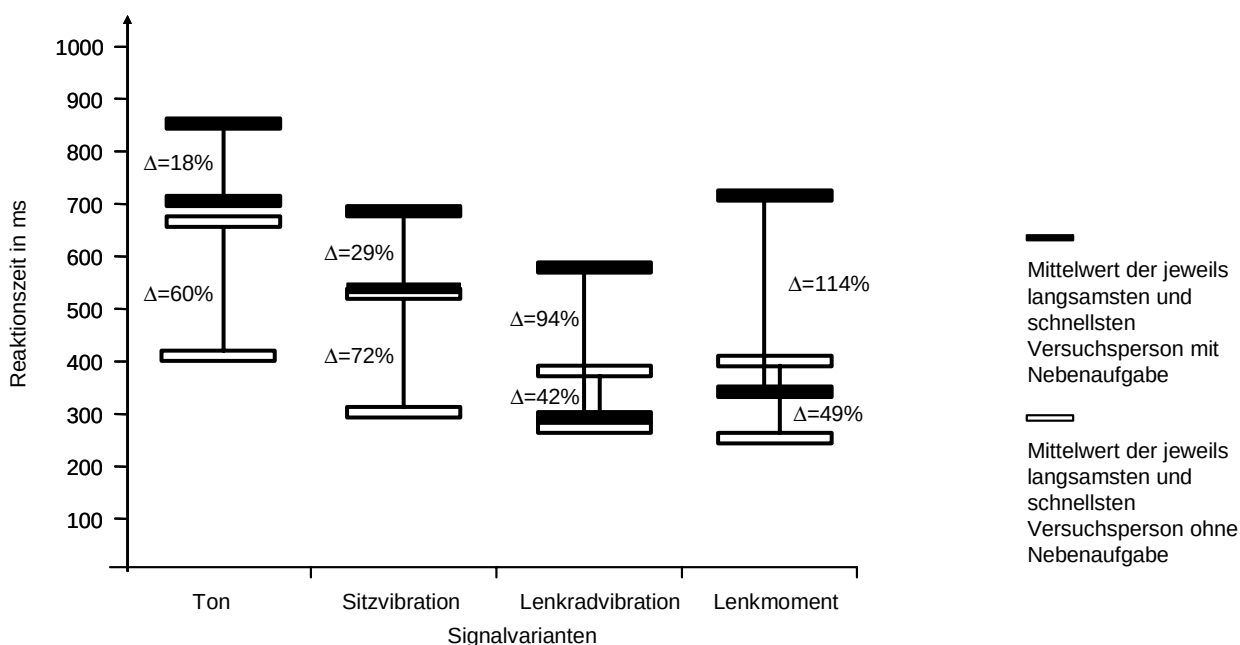


Bild 42: Ergebnisse zum Unterschied in den durchschnittlichen Reaktionszeiten auf Warnton, Sitzvibration, Lenkradvibration und Lenkmoment zwischen dem pro Signal langsamsten und schnellsten Probanden in der Gruppe mit und ohne Nebenaufgabe

Wie nicht anders zu erwarten war, bestätigen die Ergebnisse dieses Versuchs auch die interindividuellen Unterschiede der Probanden in Bezug auf ausgewählte Leistungsparameter. Bild 42 zeigt den schnellsten und den langsamsten Bediener im Vergleich. Angenommen sind hier nicht einzelne Reaktionswerte, sondern bereits der Mittelwert des Probanden über alle seine Reaktionen auf einen Signaltyp. Zwischen jeweils beiden Ver-

⁵⁶ die in dieser Arbeit verwendeten Signifikanzgrenzen sind (bezogen auf die Irrtumswahrscheinlichkeit p) „signifikant“ für $p < 0,05$, „sehr signifikant“ für $p < 0,01$ und „höchst signifikant“ für $p < 0,001$

suchspersonen sind deutliche Unterschiede festzustellen, die sich in einer bis zu zweimal längeren durchschnittlichen Reaktionszeit manifestieren.

4.3 Diskussion

Besonders die drei haptischen Arten der Signaldarbietung (Sitzvibration, Lenkradvibration und Lenkmoment) scheinen geeignet, den Fahrer zu einer schnellen Lenkreaktion zu bewegen. Die Hypothese 4.2-1 wird damit bestätigt. Diese Aussage ist von einer Nebenaufgabe unbeeinflusst. Zwar nehmen die Reaktionszeiten deutlich zu, wenn die Probanden eine zusätzliche Beanspruchung zu bewältigen haben, die Verteilung der einzelnen Signaltypen bleibt aber sowohl in der Gruppe ohne Nebenaufgabe als auch in der Gruppe mit Nebenaufgabe gleich. Damit können auch die Hypothesen 4.2-2 und 4.2-3 als bestätigt gelten. Zwischen den Fahrern ergeben sich signifikante Unterschiede. Im Vergleich des schnellsten mit dem langsamsten Fahrer sind Reaktionszeiten gemessen worden, die im Durchschnitt bis zu zweimal so lang sein können. Die Hypothese 4.2-4 wird damit abgesichert.

Diese Ergebnisse werden durch verschiedene weitere Veröffentlichungen bestätigt (siehe Kap. 2.4). Man geht darin davon aus, dass haptische Reize im Vergleich zu optischen oder akustischen Signalen etwa viermal schneller verarbeitet werden. Haptische Reize können direkt über einen Unterregelkreis im Rückenmark verarbeitet werden, hingegen können optische und akustische Information ausschließlich über das Gehirn verarbeitet werden. Dies führt bei haptischen Signalen neben kürzeren Reaktionszeiten auch zur Reduzierung der Fahrerbeanspruchung und zu weniger Fehlern. Das signifikant bessere Abschneiden der beiden Lenkrad-Signalisierungen (Lenkradvibration und Lenkmoment) besonders gegenüber dem akustischen Signal ist auf die Reiz-Reaktions-Kompatibilität zurückzuführen: Sowohl der Reiz als auch die Reaktion erfolgen über das Lenkrad. Diese beiden Signalisierungen scheinen daher besonders geeignet, eine schnelle Lenkreaktion bei den Versuchspersonen auszulösen.

Eine Verallgemeinerung dieser Versuchsergebnisse scheint allerdings problembehaftet, da nur spezifische Signale zur Verwendung kamen. Die Ergebnisse werden aber als Grundlage für die nachfolgende Untersuchungen genutzt und müssen nun nach ihrer Gewinnung im Simulator im realen Fahrversuch validiert werden.

5 Versuchsfahrzeug

Untersuchungen in virtueller Umgebung (z.B. in Fahrsimulatoren) als auch in realer, aber beeinflusster Umgebung (z.B. auf einem Testgelände) können dazu dienen, grundlegende Fragestellungen zur Gestaltung und Auslegung der Mensch-Maschine-Schnittstelle zu beantworten. Die Komplexität menschlichen Verhaltens während der Fahrzeugführung und der hohe Interaktionsgrad zwischen dem hier thematisierten Querführungsassistenten und dem menschlichen Fahrer machen allerdings eine intensive Betrachtung der Zusammenhänge im realen Straßenverkehr notwendig. Nur die dort gewonnenen Informationen liefern verlässliche Anhaltspunkte zur Abschätzung der tatsächlichen Zusammenhänge im Wirksystem Fahrer-Fahrzeug.

Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Versuchsträger aufgebaut, mit dessen Hilfe die verschiedenen Ansätze, die sich aus den Untersuchungen aus Kap. 3 und 4 ergaben, in Versuchsreihen bestätigt werden konnten. Gleichzeitig diente das Fahrzeug zu Präsentationszwecken für die innerhalb der Forschungsinitiative „INVENT“ erarbeiteten Ergebnisse der AUDI AG und wurde sowohl auf der Halbzeit- als auch auf der Abschlussdemonstration als Arbeitsergebnis vorgestellt. Da das Fahrzeug aufgrund letztgenannter Bestimmung mehrmals öffentlich präsentiert und zahlreichen Personen zugänglich gemacht wurde, galt es, in Auswahl und Integration der physikalischen Systemkomponenten den hohen Anforderungen an Funktionsumfang, Verfügbarkeit der Systemfunktionalität, Hochwertigkeit der sichtbaren Systemteile und an den designkonformen Einbau der Komponenten gerecht zu werden.



Bild 43: Außenansicht des Versuchsfahrzeugs

5.1 Systemaufbau

Als Versuchsträger diente ein modifizierter AUDI A8 des Modelljahres 2002. Das Fahrzeug besitzt einen V8-Dieselmotor mit 224 PS, Allradantrieb, ein Automatikgetriebe und eine hydraulische Servolenkung. Unter Nutzung der vorhandenen Fahrzeugausrüstung fand eine Erweiterung des Gesamtsystems hin zu einer funktionalen Umgebung zur Umsetzung, Erprobung und Präsentation des Querführungsassistenten statt. Das im Versuchsträger realisierte System besitzt prinzipiell die in Bild 44 dargestellten physikalischen Komponenten.

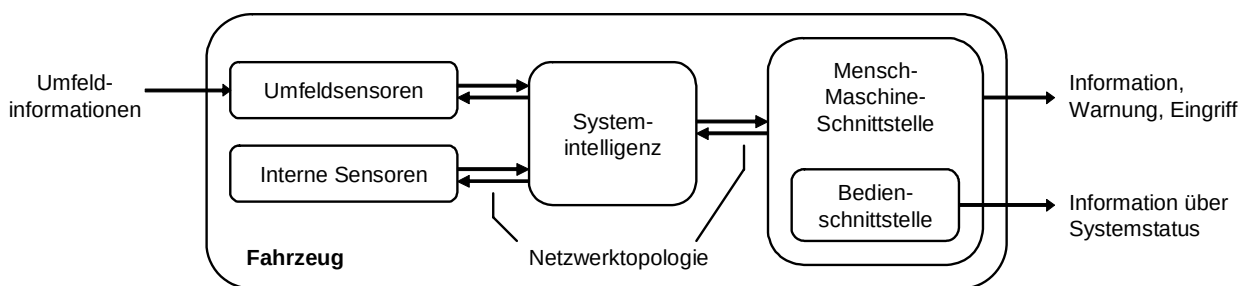


Bild 44: Physikalische Komponenten des Versuchsfahrzeugaufbaus

Zur Erfassung des eigenen Fahrzeugzustandes sind Informationsquellen notwendig. Über die fahrzeuginternen Sensoren werden bereits im Auslieferungszustand des Fahrzeugs zahlreiche Informationen auf den Bussystemen des Fahrzeugs zur Verfügung gestellt. Im Falle des ausgewählten Fahrzeugtyps können dem Fahrerassistenzsystem auf diesem Wege beispielsweise die Parameter zur Fahrzeuggeschwindigkeit, Blinkerbetätigung, zum Gierwinkel, ESP-Eingriff und zur Bremsbetätigung zugänglich gemacht werden. Die Umweltsensoren dienen der Erfassung von Informationen aus dem Umfeld, beispielsweise über Fremdfahrzeuge und den Fahrspurverlauf. Über signalverarbeitende Einheiten und eine spezielle Netzwerktopologie werden Informationen aufgenommen, weiterverarbeitet und zwischen den Komponenten ausgetauscht. Um die Interaktion des Systems mit dem Fahrer abzuwickeln, ist die Mensch-Maschine-Schnittstelle essentieller Teil des Fahrzeugaufbaus. Diese beinhaltet zudem eine Benutzerschnittstelle, die zur Aktivierung der gewünschten Systemfunktionalität, zur Parametrierung der gewünschten Funktionalität und zur Anzeige des Systemzustandes dient.

5.2 Sensorarchitektur

Die im Rahmen der in Kapitel 3.3 vorgestellten Expertenbefragung gewonnenen Erkenntnisse flossen direkt in die Auswahl der Sensoren für den Versuchsträger ein. Diese ergaben, dass eine Videosensorik zur Erkennung der Fahrspuren und der Position des eige-

nen Fahrzeugs in der Fahrspur notwendig ist. Die Kamera⁵⁷ wurde dazu im Bereich des Innenspiegelfußes hinter der Frontscheibe positioniert. Der Sensorchip nebst Objektiv ist auf einer Platine befestigt, die neben der Ansteuerung und Stromversorgung des Chips auch die komplette Bildverarbeitung mittels eines Mikroprozessors und die erforderliche Schnittstelle für den Realzeitrechner bereitstellt. Ein zusätzliches Steuergerät oder ein Videoverarbeitungsrechner war damit nicht notwendig. Die Bildverarbeitung stellt direkt auf den im Fahrzeug verbauten Bussystemen die für den Algorithmus notwendigen Parameterwerte zur Verfügung. Diese sind in Tabelle 21 zusammengefasst.

Tabelle 21: Parameter der Videosensorik

Beschreibung	Einheit	Erklärung
Ablage	m	seitlicher Versatz des Fahrzeugs von der Fahrspurmitte
Gierwinkel (-fehler)	rad	Winkel zwischen Fahrzeuglängsachse und Tangentialvektor des Straßenverlaufs
Spurkrümmung	1/m	Krümmung des Fahrbahnverlaufs
Spurbreite	m	Abstand zwischen linker und rechter Fahrbahnmarkierung
Spurcharakteristik	Wert {0,1}	Art der linken und rechten Spurmarkierungen (keine, durchgezogen, gestrichelt)
Erkennungsgüte	Wert [0,1]	Güte der Bildverarbeitung

Um den Bereich hinter und neben dem Fahrzeug im Hinblick auf Fremdfahrzeuge sensor-technisch erfassen zu können, wurden hinter dem hinteren Stoßfänger zwei Mittelbereichsradare auf 24 GHz-Basis verbaut. Mit diesen ist es möglich, Fahrzeuge auf der Nachbarspur bis zu einer Entfernung von ca. 50 m zu erfassen. Die Sensoren sind durch eine besondere Phasen-Monopulstechnik in der Lage, Azimutwinkel von 30° bei einem Öffnungswinkel von 7° in der Elevation zu messen. Mit ihnen sind Positionsbestimmungen mit ca. 1 m Genauigkeit möglich, es können Differenzgeschwindigkeiten von +160 bis -320 km/h auf 0,5 km/h präzise erfasst werden. Die Strahlcharakteristik des speziell für diese Applikation optimierten Sensors und die um $\pm 15^\circ$ aus der Längsachse nach außen gedrehte, versetzte Montage der zwei Einzelsensoren machen es möglich, auch den Seitenbereich des Fahrzeugs umfassend abzudecken. So konnte auf zusätzliche Sensoren im Seitenbereich des Fahrzeugs verzichtet werden. Die Tabelle 22 zeigt die von den Radarsensoren ausgegebenen Messgrößen.

⁵⁷ Mono-Videokamera mit CMOS-Chip mit einer Auflösung von 640*480 Pixel und aufgesetztem 20mm Objektiv. Das Kameramodul ist selbstkalibrierend, wobei die Anpassungen der Kameraparameter nach jedem Einschalten während der ersten Fahrzeugkilometer erfolgt.

Tabelle 22: Parameter der Radarsensoren

Beschreibung	Einheit	Erklärung
Sensorstatus	Wert {0,1}	Aktivierungs- und Erkennungszustand des Sensors
Objektanzahl	Wert [0,16]	Anzahl der erkannten und getrackten Objekte
Objekttrigger	Wert [0,16]	Identifikationswert für Einzelobjekte (max. 16)
Relativer Messzeitpunkt	s	Zeitpunkt der letzten Messung für jedes der max. 16 Einzelobjekte
Objektgeschwindigkeit	km/h	Geschwindigkeit für jedes der max. 16 Objekte in x- und y- Richtung im fahrzeugfesten Koordinatensystem
Objektposition	m	Position für jedes der max. 16 Objekte in x- und y- Richtung im fahrzeugfesten Koordinatensystem

Um weitere Untersuchungen zur Motivation beim Spurwechsel und zur Sensorfusion durchführen zu können, wurden im Frontbereich des Fahrzeugs zusätzliche Sensoren verbaut. Dazu wurden Mittelbereichsradare verwendet, die zu den bereits für den rückwärtigen Bereich verbauten Sensoren baugleich waren. Neben diesen wurde zudem ein Fernbereichsradar auf 77 GHz-Basis integriert. Dieser Radartyp stellt eine handelsübliche Lösung dar, da ein ähnlicher Typ den bereits als Sonderausstattung angebotenen abstandsgeregelten Tempomaten unterstützt. Mit der zusätzlichen Sensorik war es möglich, Abstand- und Geschwindigkeitsparameter des vor dem Fahrzeug liegenden Verkehrs zu gewinnen. Daneben wurden mit den Radaren Ansätze untersucht, trotz der prinzipbedingten Nachteile (punktförmige Reflektionszentren) Ausdehnung, Typ und Spurzuordnung der erkannten Objekte zu ermitteln, deren Werte dem Modell zusätzlich zur Verfügung standen. Zusammenfassend zeigt Bild 45 prinzipiell und nicht maßstabsgetreu die Sensorausstattung des Versuchsträgers.

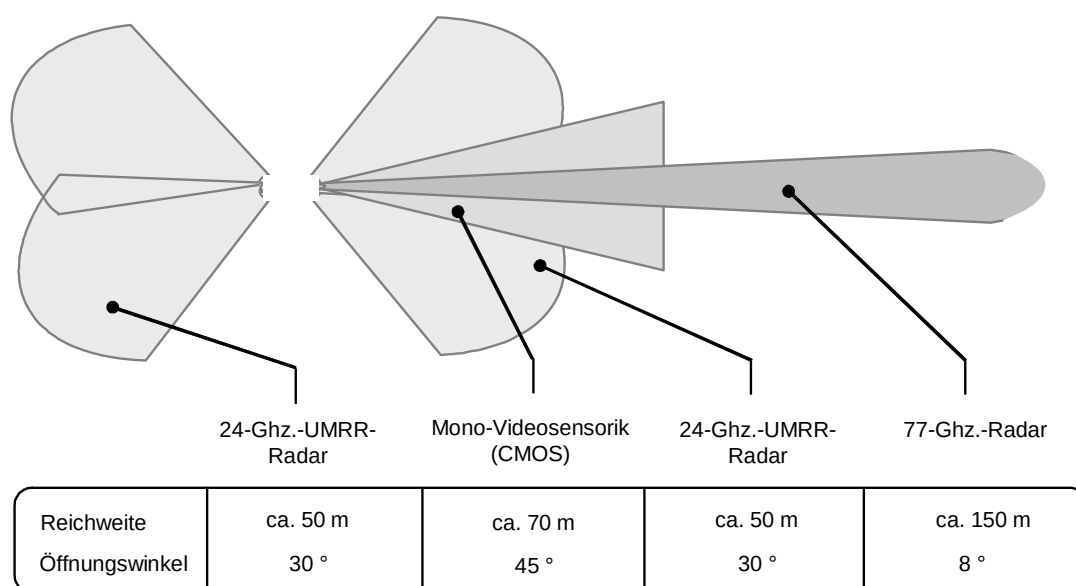


Bild 45: Erfassungsbereiche der Sensoren des Versuchsträgers (nicht maßstabsgetreu)

Die Daten der einzelnen Sensoren wurden dazu verwendet, ein konsistentes Abbild des das Fahrzeug umgebenden Umfeldes zu schaffen und den nachfolgend beschriebenen verarbeitenden Einheiten des Querführungsassistenten zugänglich zu machen.

5.3 Softwareentwicklung

Die Entwicklung der Softwaremodelle erfolgte mit Hilfe des Programmpaketes „Matlab/Simulink“. Dabei handelt es sich ursprünglich um ein interaktives Werkzeug zur Modellierung, Simulation und Analyse von dynamischen Systemen. Der Vorteil dieser Entwicklungslösung liegt zum einen in der Möglichkeit zur anschaulichen, intuitiven Umsetzung von Programmmodulen. Die Erstellung von mathematischen Modellen erfolgt grafisch mit Hilfe von Blockschaltbildern. Zum anderen ist eine Portierbarkeit der Modelle in das Versuchsfahrzeug sichergestellt. Die Simulink-Modelle werden dazu mit speziellen Tools in einen echtzeitfähigen C-Code umgewandelt und auf eine echtzeitfähige Hardware überspielt. Im Rahmen dieser Arbeit wurden dazu Hardware und Software der Firma „dSpace“ genutzt. Als Hardware kam eine so genannte „Auto-Box“ zur Anwendung. Die AutoBox ist ein modular aufgebautes Rapid-Prototyping-System. Sie arbeitet auf Basis eines 200 Mhz-Power-PCs und verfügt über vier „CAN“-Schnittstellen sowie mehrere digitale und analoge Ein- und Ausgänge. Sie erfüllt außerdem die spezifischen Anforderungen an Stoß- bzw. Temperaturfestigkeit, Spannungsversorgung und eingeschränktem Bauraum bei Verwendung in einem Versuchsträger. Ein spezielles Betriebssystem gewährleistet die Echtzeitfähigkeit des Systems und die DSpace-Software „ControlDesk“ ermöglicht die Online-Anzeige und Manipulation von Daten bzw. Parametern auf einem angeschlossenen Notebook oder über den Rechnerarbeitsplatz im Fond des Versuchsträgers. Die Softwaremodelle wurden mit Hilfe des Matlab-Programms „Real Time Workshop“ sowie der dSpace-Software in einen echtzeitfähigen Code konvertiert und anschließend auf die Auto-Box portiert. Das so erzeugte Programm kann in den permanenten Flash-Speicher der Auto-box geladen werden und steht so auf Grund der Autoboot-Funktion des dSpace-Rechners beim Start des Fahrzeugs automatisch zur Verfügung.

5.4 Mensch-Maschine-Schnittstelle

Zur Information und Warnung des Fahrers vor Fremdfahrzeugen im Gefährdungsbereich auf den benachbarten Fahrspuren wurden auf beiden Seiten des Versuchsfahrzeuges Außenspiegelanzeigen angebracht. Dazu wurde in die serienmäßigen Außenspiegelgehäuse jeweils eine Batterie roter und gelber LEDs rund um das Spiegelglas herum verbaut. Durch eine den Leuchtelementen aufgesetzte Optik konnte die punktuelle Abstrahlung der einzelnen LEDs in eine in Bezug auf die Leuchtintensität homogene und auf den Fahrer ausgerichtete Abstrahlung optimiert werden. Mit den Außenspiegelanzeigen können dem

Fahrer nun in verschiedenen Ausprägungsgraden Informationen und Warnungen über Fahrzeuge im seitlichen Gefährdungsbereich dargeboten werden. Diese optischen Signale können durch Variation der Farbe, der Intensität und des Signaltyps (z.B. blinkend, Daueranzeige) auf unterschiedliche Umgebungshelligkeiten und Gefährdungssituationen angepasst werden.



Bild 46: Außenspiegelanzeige im Versuchsfahrzeug (unaktivierter Zustand (li.), gelbe Informationsstufe (mi.), rote Warnstufe (re.))

Die im Rahmen des Querführungsassistenten behandelten Warnsignale sind aufgrund der Position der Anzeigen und unter der Annahme eines geradeaus schauenden Fahrers periphere Hinweisreize, die auf eine Situation aufmerksam machen, die der Fahrer im Außenspiegel oder mittels Schulterblick erkennen kann. BAUMANN fasst die Ergebnisse zu peripheren Hinweisreizen in vier Eigenschaften zusammen [5]. Die Verarbeitung peripherer Hinweisreize benötigt weniger mentale Kapazität als die zentralen Hinweisreize. Eine Aufmerksamkeitsverlagerung, die durch periphere Hinweisreize ausgelöst wird, ist weniger leicht zu unterdrücken als eine Orientierungsreaktion infolge zentraler Hinweisreize. Die Wirkung peripherer Hinweisreize ist nicht durch die Erwartung der Versuchsperson bezüglich der Art des Hinweisreizes beeinflusst. Periphere Hinweisreize sind insgesamt effektiver in der Attraktion von Aufmerksamkeit. Sie müssen allerdings bestimmte Merkmale erfüllen. POSNER, NISSEN & OGDEN dokumentieren als peripheren Hinweisreiz einen überschwelligen Helligkeitsanstieg im peripheren Sichtfeld [96]. Dieser wird seither sehr oft als peripherer Hinweisreiz verwendet.

Im Rahmen einer Diplomarbeit untersuchte KIENAST, wie das Signal zur Warnung vor Fremdfahrzeugen auf der Zielspur beim Spurwechsel optimal gestaltet werden muss [57]. Dazu führte er einen Fahrversuch mit 20 Probanden durch. Diese fuhren auf der Autobahn und mussten sich auf den vor ihnen liegenden Verkehr konzentrieren. Um diese Aufmerksamkeitszuwendung zu forcieren, befragte der Versuchsleiter die Probanden stetig über das vor ihnen liegende Fahrzeug. Damit sollte eine Unaufmerksamkeit bezüglich der Außenspiegel erzwungen werden. Im Laufe der Fahrt wurden fünf verschiedene Warnsignale je Seite 10-mal präsentiert. Die Signale unterschieden sich in der Häufigkeit der Helligkeitsanstiege, der Länge der An-Phasen und der Leuchtdauer insgesamt. Sie sollten mit Hilfe eines Fingertasters den Zeitpunkt markieren, ab dem sie das periphere Signal im Außenspiegel wahrnahmen. Zur Untersuchung der Blendwirkung wurden die Warnsignale nach

Abschluss der Versuchsfahrt direkt präsentiert und die Probanden nach ihrer Meinung befragt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Entdeckungswahrscheinlichkeit hoch signifikant von der Seite abhängt, auf der das Signal präsentiert wurde. So wurden die Signale auf der rechten Seite signifikant weniger erkannt, als die Signale im linken Außenspiegel ($p < 0,0005$). Wichtige Hinweise zur Erklärung dieses Effektes liefert die Arbeit von LEIBOWITZ & APELLELE [65]. Sie untersuchten den Einfluss einer Aufgabe im zentralen Sichtfeld auf die Leuchtdichteschwelle in Abhängigkeit des Winkels vom Fixationspunkt. Nimmt man aus ihren Versuchen die Schwellwerte und interpoliert sie, kann man den Helligkeitsunterschied in Abhängigkeit der Winkel bestimmen. KIENAST zeigt, dass obwohl die Winkel zwischen verschiedenen Fahrern und deren Sitzposition absolut gesehen auf der linken Seite größer sind, die Winkelunterschiede zur rechten Außenspiegelseite einen größeren Einfluss auf die Entdeckungswahrscheinlichkeit aufgrund der Helligkeitsunterschiede hat. Für die verschiedenen Warnsignale konnte kein signifikanter Unterschied in der Entdeckungswahrscheinlichkeit nachgewiesen werden. Sowohl die tatsächliche wie die wahrgenommene Gesamtleuchtdauer und auch die Anzahl der Helligkeitsanstiege verfehlt die Signifikanz. Damit erfüllen alle fünf Warnsignale ihre Funktion, da auch die Reaktionszeiten sich nicht unterschieden. Sie lagen im Mittel zwischen 709 ms und 736 ms. Die Standardabweichung hatte einen Durchschnittswert von 296 ms.

Zudem wurden am Versuchsfahrzeug umfangreiche Modifikationen zur Darstellung synthetischer Lenkmomente und der Vibration des Lenkrades vorgenommen. Dazu wurden in die Lenksäule ein Elektromotor mit Winkelsensor sowie zwei Drehmomentsensoren integriert. Bild 47 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Systems [16].

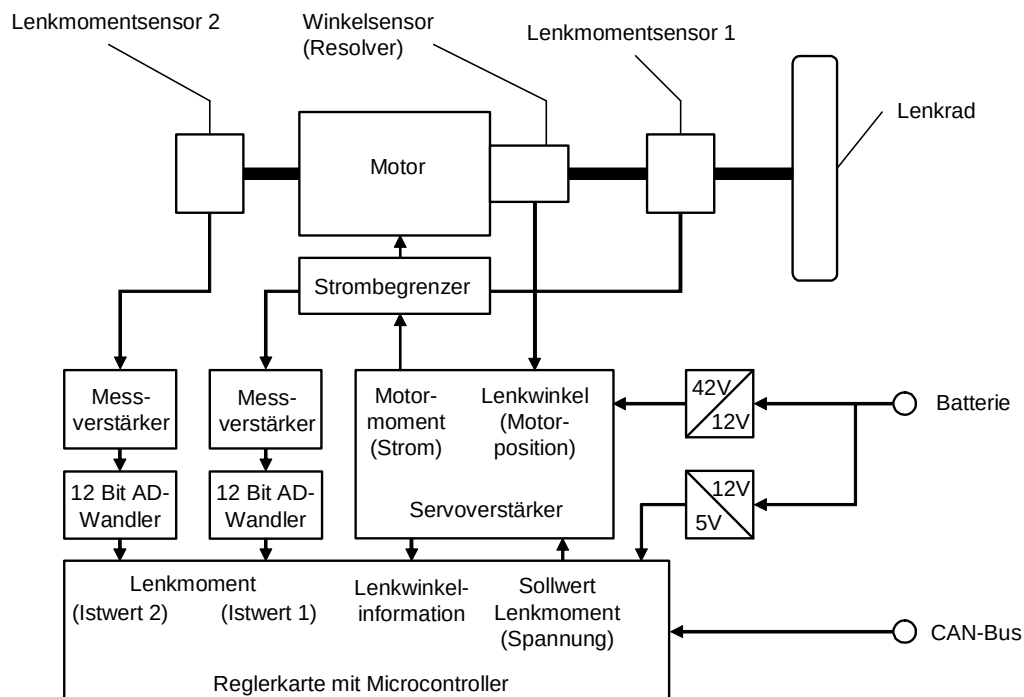


Bild 47: Blockschaftbild der Lenkaktuatorik im Versuchsfahrzeug nach BUSCHARDT

Dabei wurde die Lenksäule aufgetrennt, um die zusätzlichen Elemente integrieren zu können. Nach Abschluss der Arbeiten wurde aber die vollständige mechanische Verbindung zwischen Lenkrad und Rädern wiederhergestellt. Der Motor wurde dabei so dimensioniert, dass das maximal erzeugbare Drehmoment ausreicht, um gleichzeitig vorhandene Lenkmomente zu kompensieren und zusätzliche synthetische Lenkmomente von bis zu 8 Nm in Gegenrichtung zu erzeugen. Da aber sowohl die konventionelle als auch die synthetisch generierten Lenkmomente in der Regel rückstellend in die Geradeausfahrtposition wirken, wird zumeist nur ein Bruchteil der Maximalleistung des Motors benötigt. Die Konstruktion ist vergleichbar mit einer elektrischen Servolenkung, arbeitet hier allerdings ergänzend zur hydraulischen Servolenkung des Fahrzeugs.

Mit dieser Konstruktion ist es möglich, über die Autobox und dem die Lenkmomentaktuatorik verbindenden Bussystem verschiedenartige Signaltypen von Lenkmomenten und Lenkradvibrationen darzustellen.

5.5 Bedienschnittstelle

Die Aktivierung des Gesamtsystems durch den Fahrer erfolgte mit Hilfe eines Tasters in der Mittelkonsole des Fahrzeugs. Der Systemstatus wird durch eine in der Tasteroberfläche eingelassenen LED angezeigt. Das System aktiviert sich als Folge der Ergebnisse aus der in Kapitel 3.2 vorgestellten Multimediabefragung automatisch ab einer voreingestellten Geschwindigkeitsschwelle. Die Statusanzeige informiert den Fahrer durch ein grünes Signal, dass das System aktiviert und aktiv ist, im Falle einer roten LED, dass das System zwar aktiviert ist, gerade aber (z.B. aufgrund mangelhafter Güte der Sensordaten) inaktiv ist. Um im Rahmen der Fahrversuche dem Fahrer zu ermöglichen, zwischen verschiedenen Systemausprägungen umzuschalten, wurde zwischen den Sitzen in der Mitteltunnelablage ein frei programmierbarer Dreh-Drück-Steller integriert. Die vom Bediener eingestellte Schalterstellung wird über eine digitale Schnittstellenkarte an die AutoBox übertragen. In Abhängigkeit von der Schalterstellung können die jeweiligen Varianten, die durch verschiedene Modellparameter festgelegt sind, eingestellt werden.

5.6 Netzwerk

Zur Übertragung der Daten sowohl der Sensorik wie auch der Aktuatorik dienen vier verschiedene CAN-Busse. Die ursprüngliche Busstruktur besteht aus dem serienmäßig vorhandenen Antriebs-CAN. Die Signale der serienmäßigen Fahrzeugsensoren zum Beispiel in Motor und Getriebe werden auf den Antriebs-CAN des Fahrzeugs übermittelt und können dort abgegriffen werden. Auf diesem Wege stehen die Werte zur aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeit, zu einem aktuellen Eingriff der Stabilitätskontrolle oder zur Blinkerbetätigung durch den Fahrer dem Modell zur Verfügung. Für die Sensorik sind zwei CAN-Busse vorgesehen. Auf dem einen legen die im Frontbereich des Fahrzeugs verbauten Radar-

sensoren sowie die Videosensorik ihre Daten ab. Der dritte Bus ist den hinteren Radarsensoren vorbehalten. Aus Sicherheitsgründen wurde für die Ansteuerung der Lenkmomentaktuatorik ein eigenes, viertes Bussystem aufgebaut.

Die dSpace-AutoBox ist in der Lage, über eine geeignete Einschubkarte bis zu vier CAN-Busse zu verwalten und von diesen Daten zu lesen und auf diese aufzuschreiben. Das Modell des Querführungsassistenten kann so auf die Informationen aus der Sensorik zugreifen und die erforderlichen Reaktionen des Systems an die Aktuatoren weitergeben. Über zusätzliche Schnittstellenkarten, die in die ISA-Slots der AutoBox eingelegt sind, können sowohl digitale als auch analoge Signale an die Peripherie weitergegeben werden. Die Außenspiegel-HMI wird so über eine digitale I/O-Karte angesteuert. Den prinzipiellen Aufbau der Netzwerktopologie und der dadurch verbundenen Elemente zeigt Bild 48.

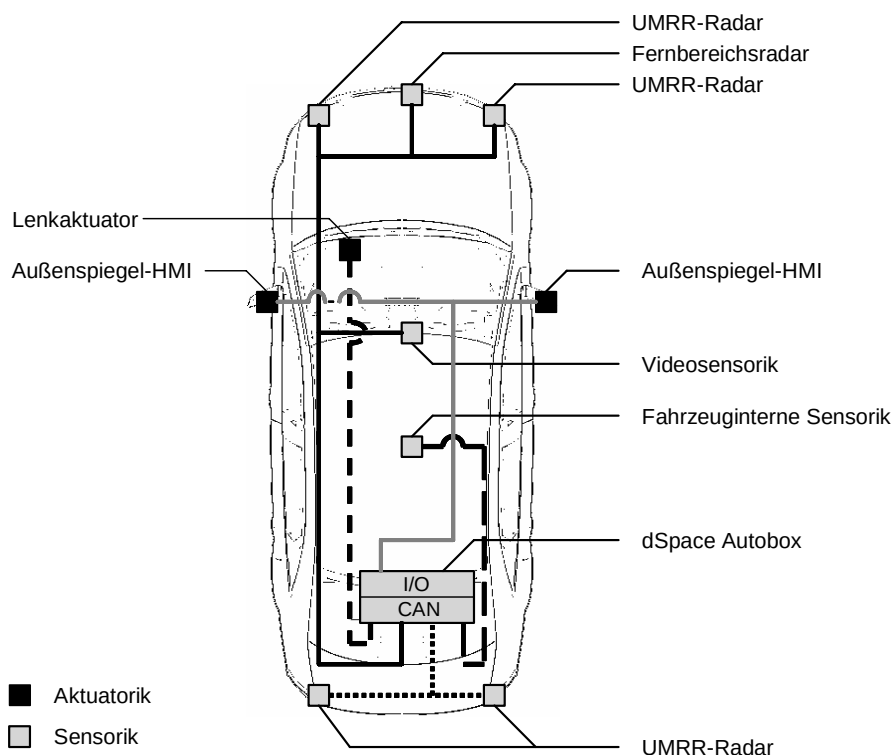


Bild 48: Prinzipielle Vernetzungsarchitektur der Sensorik und Aktuatorik des Versuchsfahrzeugs

5.7 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde der Versuchsträger vorgestellt. Bei der Auswahl der Sensoren wurde auf die Ergebnisse aus der Expertenbefragung zurückgegriffen, indem die darin vorgeschlagenen Sensortypen verbaut und um eine zusätzliche Sensorik nach vorne ergänzt wurden. Die im Versuchsträger implementierte Mensch-Maschine-Schnittstelle macht eine Signaldarbietung des Systems über optische und haptische Anzeigen möglich. Verschiedene Signalarten unterschiedlichen Eingriffsgrades sind damit zu Untersuchungs-

zwecken darstellbar. Die Vernetzungstopologie und die Entwicklungsplattform sind den hohen Anforderungen der verbauten Elemente angemessen. Das Modell des Querführungsassistenten wurde so umgesetzt, dass im Realfahrzeug eine möglichst flexible Überprüfung der Systemfunktionalität möglich ist. Für die nachfolgenden Fahrversuche steht so ein Versuchsfahrzeug zur Verfügung, das eine entwicklungsbegleitende Erprobung des Querführungsassistenten im realen Fahrbetrieb erlaubt.

6 Entwurf einer fahrergerechten Warnstrategie

In den voranstehenden Ausführungen konnte deutlich gezeigt werden, dass ein integriertes Fahrerassistenzsystem, das den Fahrer sowohl beim Spurwechsel als auch in der Spurhaltung unterstützt, Potential zur maßgeblichen Steigerung der Verkehrssicherheit auf Autobahnen und Landstraßen besitzen kann. Damit der Querführungsassistent diese Möglichkeiten auch mit einem hohen Wirkungsgrad umsetzen kann, rücken nun die Auslegung der Warnstrategie, die Ausgestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle und die Weitergabe der Systemausgaben an den Fahrer in den Blickpunkt. In diesem Kapitel soll deshalb eingangs auf die grundlegenden Prinzipien zur fahroptimierten Gestaltung eingegangen werden. Anschließend werden verschiedene Ansätze beschrieben, mit deren Hilfe und unter Berücksichtigung der relevanten Gestaltungskriterien eine fahroptimierte Warnstrategie und benutzergerechte Auslegung der Mensch-Maschine-Schnittstelle möglich ist. Die Fragen nach der Anzahl und Gestaltung der Warnsignale, nach dem Grad der Unterstützung und nach der Akzeptanz und Praktikabilität von Modellen zur Spurwechselwunscherkennung sind so essentiell, dass sie in jeweils eigenen Fahrversuchen behandelt und die Ergebnisse besprochen werden sollen.

6.1 Gestaltungsprinzipien

Herkömmliche Prinzipien und Kataloge, die zur Gestaltung bestimmter technischer Systeme vorliegen, stoßen aufgrund der Komplexität und des Interaktionsgrades bei Fahrerassistenzsystemen schnell an ihre Grenzen. Es existiert eine Vielzahl von Normen und Gestaltungsrichtlinien, die für dieses Thema mehr oder weniger große Relevanz besitzen. Im Folgenden sind verschiedene Gestaltungsprinzipien erklärt, entsprechend ihrer Relevanz zusammengetragen und in drei inhaltliche Blöcke zu den Bereichen *Kontrollierbarkeit*, *Gebrauchssicherheit* und *Verständlichkeit* des Querführungsassistenten zusammengestellt. Grundsätzlich sind die einzelnen Prinzipien nicht disjunkt, es bestehen zahlreiche wechselseitige Beziehungen und Überschneidungen.

Ein technologisch komplexes Fahrerassistenzsystem wie der Querführungsassistent muss für den Bediener jederzeit kontrollierbar sein. Die Wahrscheinlichkeit, dass der Fahrer kritische Situationen meistern kann, ohne dass ein Unfall geschieht, muss mit Systemunterstützung größer sein als ohne System. Die strikte Forderung nach der Kontrollierbarkeit des Systems bedeutet auch, dass Fehler des Fahrers nicht zu unsicheren Systemzuständen führen dürfen. Zudem muss der Fahrer die Möglichkeit haben, die Interaktion mit dem System zu steuern. Er bestimmt Zeitpunkt und Intensität der Interaktion. Die Unterstützung durch das System darf nicht zu Ablenkung, zusätzlicher (oder auch deutlich weniger) Belastung oder zu Aufmerksamkeitsdefiziten beim Fahrer führen. Der Fahrer sollte sich wei-

terhin darauf verlassen können, dass die Warnungen und Aktionen des Systems sinnvoll priorisiert an ihn weitergegeben werden. Diese Prinzipien, die die *Kontrollierbarkeit* des Systems sicherstellen, sind in Tabelle 23 zusammenfassend dargestellt. Die konkreten Forderungen an die Systemgestaltung, die sich aus den Prinzipien ableiten lassen, sind ebenfalls formuliert.

Tabelle 23: Gestaltungsprinzipien zur Kontrollierbarkeit des Querführungsassistenten

Ziel	Forderung
Fehlertoleranz	Der Querführungsassistent ist robust gegenüber missbräuchlicher Nutzung, die auf Handlungsfehler und Fehlbedienungen des Fahrers zurückgeht.
Steuerbarkeit	Der Querführungsassistent ermöglicht dem Benutzer, die Interaktion mit dem System und die Systemaktionen jederzeit zu unterbrechen und zu übersteuern.
Ablenkungsfreiheit	Der Querführungsassistent lenkt durch seine Bedienung oder durch seine Aktionen den Benutzer nicht von der Fahraufgabe ab.
Belastungsoptimierung	Der Querführungsassistent erhöht die Belastung des Fahrers nicht; auch eine evtl. systeminduzierte, verminderte Beanspruchung führt nicht zu kritischen Situationen.
Aufmerksamkeitsoptimierung	Die Nutzung des Querführungsassistenten provoziert keine monotonen Situationen und damit eine Reduzierung der Vigilanz und/oder der Aufmerksamkeit.
Aktionspriorisierung	Die Aktionen des Querführungsassistenten sind im Kontext aller Warnungen und Informationen von System, Fahrzeug und anderen Systemen sinnvoll priorisiert.

Unter dem Oberbegriff der *Gebrauchstauglichkeit* sind all jene Prinzipien zusammengefasst, deren Erfüllung sicherstellt, dass der Querführungsassistent den Fahrer effektiv und effizient in der Durchführung der Fahraufgabe unterstützt (siehe Tabelle 24). Eine einfache und intuitive Bedienung des Systems über geeignete Stellglieder stellt eine Grundvoraussetzung dar. Das System sollte sich einerseits selbstständig an den Fahrer anpassen, doch andererseits noch die Möglichkeit bieten, dem Bediener die Einstellung bestimmter Systemfunktionalitäten (z.B. Warnschwellen) zu überlassen. Diese unter dem Begriff der Adaptivität bekannte Forderung ist allerdings mit großer Vorsicht in der Systemgestaltung umzusetzen. Ein hoher Grad an Adaptivität (z.B. durch Modelle, die versuchen, die Fahrcharakteristik des Fahrers auszuwerten und darauf aufbauend die Systemaktionen anzupassen) geht zu Lasten von Intuitivität und Transparenz. Je mehr Eingangsgrößen ein System zu seiner Verarbeitung heranzieht, desto schwerer wird es für den Fahrer auch, das System und dessen Reaktionen zu verstehen und sich eine verlässliche Vorstellung von der zu erwartenden Systemreaktion zu machen. Deshalb ist die Skalierbarkeit und Individualisierbarkeit des Systems zwar notwendig, diese individuelle Anpassung kann aber auch dem Fahrer überlassen werden. Dieser kann über die jeweilige Bedieneinheit zwischen einigen, wenigen verschiedenen Systemkonfigurationen wählen. Auf dem au-

genblicklichen Stand der Technik ist der Mensch sogar eher in der Lage, sich einem System anzupassen, als es umgekehrt der Fall ist.

Tabelle 24: Gestaltungsprinzipien zur Gebrauchstauglichkeit des Querführungsassistenten

Ziel	Forderung
Bedienbarkeit	Der Querführungsassistent ist einfach, auch ohne Vorwissen intuitiv bedienbar.
Effektivität	Der Querführungsassistent unterstützt den Fahrer in der genauen und vollständigen Zielerreichung.
Effizienz	Der Querführungsassistent bedeutet einen im Verhältnis zur Effektivität niedrigen Aufwand.
Gewöhnung	Der Querführungsassistent erlaubt eine einfache Gewöhnung, führt aber nicht durch Gewöhnungs- und Kompensationseffekte zu einer risikoreicheren Fahrweise.
Adaptivität	Der Querführungsassistent ist skalierbar und flexibel und erlaubt eine Individualisierung.

Die *Verständlichkeit* des Systems setzt eine hohe Güte der dargebotenen Informationen voraus. Dazu muss das Systemverhalten für den Bediener jederzeit vorhersehbar und die Funktionalität klar ersichtlich sein. Zudem muss der Fahrer eindeutige Rückmeldung über die Systemzustände erhalten. Dies kann beispielsweise durch ein Signal erfolgen, das ihm den aktuellen Systemstatus kenntlich macht. So weiß er, in welchen Situationen er mit der Systemunterstützung rechnen kann und in welchen das System inaktiv ist. Das beinhaltet aber auch, dass dem Fahrer die Grenzen des Systems unmissverständlich klar sind. Einschränkungen, die sich beispielsweise aus der verwendeten Sensorik ergeben (z.B. eingeschränkte Leistungsfähigkeit der Videosensorik bei Regen; beschränkte Reichweite der Radarsensoren), müssen daher dem Fahrer deutlich (bereits im Vorfeld) mitgeteilt werden. Erst ein transparentes Systemverhalten, das es dem Fahrer jederzeit ermöglicht, das System und seine Funktionalität zu verstehen und die Aktionen nachzuvollziehen, kann zu einer sinnvollen Unterstützung des Fahrers führen. Tabelle 25 führt, analog zu den vorherigen Tabellen, die Prinzipien zur Verständlichkeit des Querführungsassistenten auf. Nur wenn die Verständlichkeit des Systems sichergestellt ist, wird der Bediener dieses als Kooperationspartner annehmen und in seine Fahrhandlung integrieren.

Tabelle 25: Gestaltungsprinzipien zur Verständlichkeit des Querführungsassistenten

Ziel	Forderung
Erlernbarkeit	Der Querführungsassistent unterstützt die schnelle Bildung eines mentalen Modells der Systemfunktionalität. Die einzelnen Schritte sind für den Benutzer verständlich (Selbstbeschreibungsfähigkeit).
Vorhersehbarkeit	Der Querführungsassistent zeigt keine Systemreaktionen, die vom Fahrer oder anderen Verkehrsteilnehmern nicht verstanden werden. Evtl. Einsatzbeschränkungen sind für den Fahrer nachvollziehbar.
Transparenz	Der Querführungsassistent stellt sicher, dass trotz hoher Komplexität die Sichtbarkeit von Dingen und Funktionen, welche dem Anwender zur Orientierung innerhalb der möglichen Handlungen verhilft, gegeben ist.
Konsistenz	Der Querführungsassistent entspricht in seinen Aktionen den Erwartungen des Fahrers, die sich aus Erfahrungen mit bisherigen Abläufen und der bisherigen Benutzung des Systems bzw. anderer Systeme ergeben.
Kompatibilität	Die Aktionen und die Gestaltung des Querführungsassistenten stimmt mit anderen Systemen oder Gestaltungsvorlagen überein.
Interaktionsgeschwindigkeit	Das Antwortverhalten des Querführungsassistenten ist für den Fahrer transparent und konsistent, die Antwortzeiten des Systems variieren wenig, ähnliche Situationen bewirken ähnliche Aktionen.

6.2 Rechtzeitigkeit und Rechtmäßigkeit

Rechtmäßigkeit und Rechtzeitigkeit sind zwei der fundamentalen Forderungen an die Aktionen eines Assistenzsystems.

Die *Rechtmäßigkeit* der Systemaktionen muss jederzeit sichergestellt sein. Der Begriff bedeutet, dass der Fahrer die Art der Reaktionen des Systems und damit auch die Eskalation einer vorliegenden Situation durch das System nachvollziehen kann. Er muss verstehen, warum ihm das System in einer (kritischen) Situation über Warnungen und Aktionen seine Unterstützung anbietet. Eine Systemauslegung, die den Fahrer in Situationen warnt, deren Gefährdung er nicht nachvollziehen kann, kann durchaus als bevormundend gelten und an Vertrauen dem Nutzer gegenüber einbüßen. Werden die Warnungen dauerhaft als unrechtmäßig wahrgenommen, wird der Fahrer das Assistenzsystem über kurz oder lang deaktivieren. Ein möglicher Sicherheitsgewinn kann damit natürlich nicht mehr realisiert werden.

Rechtzeitigkeit bezieht sich auf den Zeitpunkt, zu dem die Signaldarbietung an den Fahrer erfolgt. Kommen die Reaktionen des Systems zu früh, kann der Fahrer diese nicht flüssig in seine normale Fahraufgabenbearbeitung integrieren, das System handelt unkooperativ. Kommen sie zu spät, kann er nicht darauf reagieren. Im schlechtesten Fall stören die späten Warnungen ihn auch noch in der eigenständigen Auflösung der kritischen Situation. Das kann sogar zur Folge haben, dass das System keinen Sicherheitsnutzen bietet, son-

dern eine zusätzliche Gefahrenquelle darstellt. Den Zeitpunkt der Systemreaktionen zu berechnen, ist ein entscheidender Vorgang. Ein System, das unbegründet Alarm schlägt, wird früher oder später nicht mehr ernst genommen, verliert Akzeptanz und damit seinen Nutzen. Dieser Effekt wird „Cry-Wolf Effect“ genannt. MUTSCHLER formuliert die Auswirkungen dieses Effektes folgendermaßen: „the effects of warning signal failure may take many forms. False, missing and conflicting signals may undermine confidence in system accuracy and reduce subsequent reliance and adherence. Different situation perception by the driver can result in disregarding the warning signal. (...) Well chosen warning criteria are possibly more important than the ultimate choice of specific details of the warning signal“⁵⁸ [74]. Bild 49 zeigt den beschriebenen Zusammenhang auf anschauliche Weise.

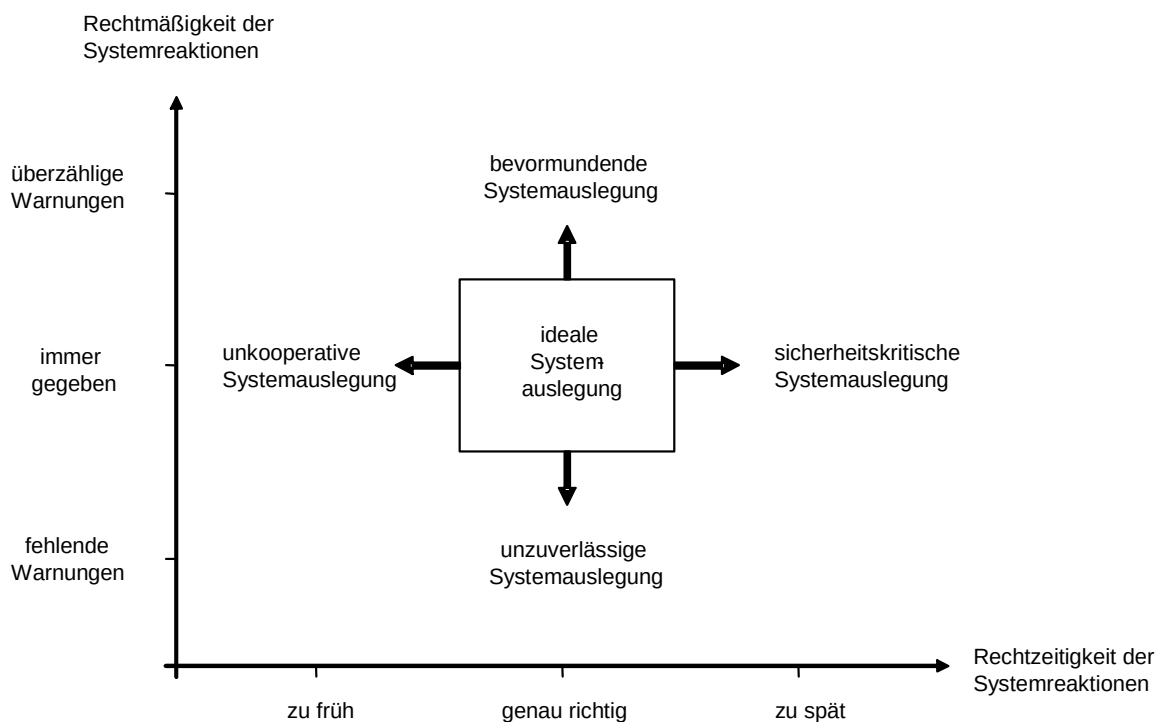


Bild 49: Rechtmäßigkeit und Rechtzeitigkeit der Systemreaktionen eines Fahrerassistenzsystems

In Ergänzung der oben genannten Richtlinien soll hier kurz auf die Idee von PATTERSON eingegangen werden [91]. Dieser nennt fünf Kriterien für ein gutes Warnsystem, die helfen sollen, den Zielkonflikt aus Detektierbarkeit des Reizes und der Beeinträchtigung durch diesen zu vermeiden. Diese Kriterien spezifizierte PATTERSON für akustische Meldungen. Im Folgenden sollen diese aber verallgemeinert werden, so dass sie auch auf visuelle und

⁵⁸ Übersetzung: „Die Effekte einer Fehlfunktion des Warnsignals können viele Formen annehmen. Falsche, fehlende und widersprüchliche Signale können das Vertrauen in die Fehlerfreiheit des Systems unterminieren und anschließend Vertrauen und Beachtung reduzieren. Eine unterschiedliche Wahrnehmung der Situation durch den Fahrer kann dazu führen, dass das Warnsignal missachtet wird. Sorgfältig gewählte Warnkriterien sind möglicherweise wichtiger als die genaue Auswahl bestimmter Details des Warnsignals“

haptische Signale anwendbar sind. Tabelle 26 zeigt diese Kriterien. Die dazugehörigen Handlungsempfehlungen sind ebenfalls aufgeführt.

Tabelle 26: Ziele bei der Gestaltung von Warnsignalen nach PATTERSON

Ziel	Erklärung
Informationsgehalt	Die Warnung weist einen hohen Informationsgehalt durch einen rechtzeitigen und rechtmäßigen Systemeingriff in Gefahrensituationen auf.
Wahrnehmbarkeit	Warnung weist vor jeweiligen Umgebungsverhältnissen eine hohe Entdeckungswahrscheinlichkeit (z.B. durch Signalgestaltung, Intensitätsregelung) auf.
Gefahrlosigkeit	Die Warnung induziert nicht mehr Gefahr als eigentlich vermieden werden sollte.
Aufsehen	Ein übermäßiges Aufsehen durch die Warnung wird (z.B. durch Intensitätsregelung, Signalort) vermieden.
Beeinträchtigung	Die Warnung beeinträchtigt die Verarbeitung anderer Informationen nicht oder erzeugt keinen zusätzlichen Stress.

In den folgenden Abschnitten werden Ansätze vorgestellt, die die formulierten Forderungen nach Rechtmäßigkeit und Rechtzeitigkeit der Aktionen des Querführungsassistenten sicherstellen sollen. Dies erfolgt unter Berücksichtigung der ebenfalls vorgestellten Gestaltungsprinzipien zur Kontrollierbarkeit, Gebrauchssicherheit und Verständlichkeit.

6.2.1 Der absichtliche Spurwechsel

Um den Zeitpunkt für die Aktionen zur Absicherung bzw. zur Unterstützung beim Spurwechsel zu bestimmen, kann auf zwei Arten von Kriterien zurückgegriffen werden: technisch-physikalische und subjektiv-erfahrungsbasierte. Technisch-physikalische Kriterien werden unter bestimmten Annahmen aus physikalischen Größen berechnet. Technisch-physikalische Kriterien sind objektiv und liefern aufgrund des strengen mathematischen Zusammenhangs bei identischen Eingangsgrößen immer die gleichen Ergebnisse. Sie sind allerdings nicht immer für den Fahrer nachvollziehbar. Beispielsweise würde ein sorgfältiger Autofahrer bei widrigen Wetterbedingungen intuitiv etwas vorsichtiger fahren als in einer Umgebung ohne wetterbedingte Einschränkungen. Subjektiv-erfahrungsbasierte Kriterien beruhen auf der subjektiven Einschätzung verschiedener Nutzer. Sie sind intuitiv und stoßen deshalb auf mehr Akzeptanz beim Fahrer. Die Probleme der subjektiv-erfahrungsbasierten Kriterien sind Fehleinschätzungen, die ihre Ursache beispielsweise in den physiologischen Grenzen der menschlichen Wahrnehmung oder in der augenblicklichen Belastungssituation haben können.

Im Spurwechselfall spielt die *Time to Collision (TTC)*, die Zeit bis zu einer Kollision, eine herausragende Rolle. Sie wird sowohl vom menschlichen Fahrer als subjektiv-

erfahrungsbasiertes Kriterium zur Gefährdungsberechnung herangezogen, kann aber auch als technisch-physikalische Größe berechnet werden.

6.2.1.1 Time to Collision (TTC)

Der Mensch hat Schwierigkeiten, Abstände und Geschwindigkeiten von Objekten zu schätzen, die sich auf ihn zu oder von ihm weg bewegen. Dies gilt besonders in Situationen, in denen sich Objekte nicht geradlinig auf einen Beobachter zu oder von diesem weg bewegen, sondern deren Bewegungstrajektorien in einem Winkelverhältnis zu der des Fahrers stehen, das nicht 0° oder 180° beträgt. Im Spurwechselfall kommt erschwerend hinzu, dass die Informationen, die der Fahrer über den nachfolgenden Verkehr heranziehen kann, zusätzlich über die Spiegel und deren Charakteristika verändert werden.

Die Kritikalitätsbeurteilung, die ein menschlicher Fahrer beim Spurwechsel vornimmt, geht im Wesentlichen auf die Fähigkeit zurück, die TTC zu den Fahrzeugen in der umgebenden Verkehrsszenarie zu schätzen. Bild 50 verdeutlicht die Zusammenhänge und die zur Berechnung notwendigen Größen. So geht man bei der Berechnung der TTC davon aus, dass die Differenzgeschwindigkeit Δv zwischen den einzelnen potentiellen Kollisionsfahrzeugen konstant ist. Einflüsse durch Beschleunigungs- oder Bremsvorgänge werden nicht berücksichtigt. Die TTC zwischen zwei Fahrzeugen beispielsweise nach kurz vorher abgeschlossenem Spurwechselmanöver ist in Bild 50 visualisiert, die Berechnung erfolgt nach Formel 1. Auch die ISO-Norm nutzt zur Definition und Spezifikation von Spurwechselassistentensystemen die TTC.

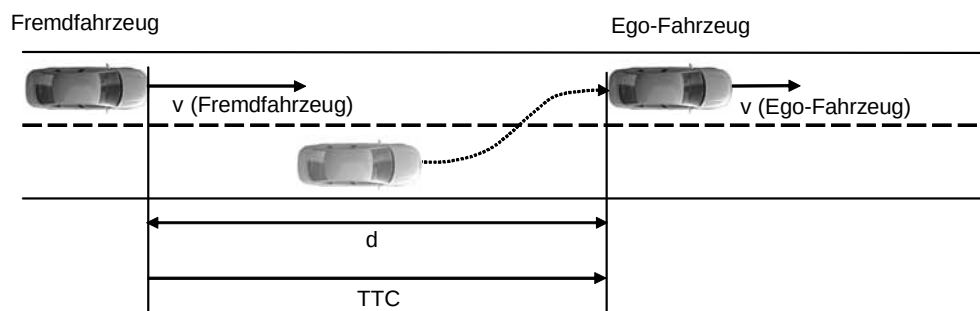


Bild 50: Berechnung der Time to Collision (TTC) zwischen zwei Fahrzeugen

$$TTC = \frac{d}{\Delta v} \quad \text{mit } \Delta v = v(\text{Fremdfahrzeug}) - v(\text{Ego-Fahrzeug}) \quad (\text{Formel 1})$$

Δv = Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Fahrzeugen in m/s

d = Abstand zwischen Fahrzeugen in m

Aus den in Kapitel 2.3.5 vorgestellten Untersuchungen über typische TTC-Werte beim Spurwechsel lassen sich einige Annahmen ableiten. Bevor ein spurwechselndes Fahrzeug nicht mindestens teilweise auf der Zielspur fährt, kann kein Unfall mit einem Fahrzeug auf

dieser Spur stattfinden. Demzufolge wird auch die subjektive Einschätzung der TTC nicht unter einer Sekunde und nur selten unter zwei Sekunden liegen. Ist der Spurwechsel beendet, bedeutet dies meist, dass sich der Verkehr in der Zielspur und das Ego-Fahrzeug aneinander angepasst haben. Aufgrund der Untersuchungen von OLSEN ET AL. kann man davon ausgehen, dass kaum Fälle auftauchen, in denen die TTC mehr als zehn Sekunden ($\approx$ Obergrenze des 95%-Konfidenzintervalls) beträgt [78].

6.2.1.2 Kritikalitätsbeurteilung menschlicher Fahrer beim Spurwechsel

Zu den Prozessen menschlicher Informationsverarbeitung bei der Schätzung der TTC durch den Menschen gibt es widersprüchliche Befunde. Es existieren zwei bedeutende Theorien, die beide eine ähnlich gute empirische Grundlage haben.

Die eine Theorie zur Schätzung der TTC wird als *Computational* bzw. *Cognitive Approach* bezeichnet. Diese geht davon aus, dass der Beobachter die TTC zu anderen Objekten aus der Entfernung und der Geschwindigkeit berechnet. Er nimmt beide Größen unabhängig voneinander wahr. Nach dem klassischen Versuchsaufbau schätzen Versuchspersonen Geschwindigkeit und Entfernung ein und teilen diese verbal dem Versuchsleiter mit, der daraus die TTC ableitet. Die Ergebnisse zahlreicher Experimente zeigen konsistent, dass die Annäherungsgeschwindigkeit und, in noch gravierenderen Maße, die Entfernung unterschätzt werden [108] [113]. Eine Erklärung für diese Fehleinschätzung besagt, dass die Beobachter die wahrgenommenen Informationen bezüglich Geschwindigkeit und Entfernung, welche für die TTC-Berechnung benutzt werden, nicht verbalisieren können [114].

Die zweite Theorie zum *Ecological Optics* bzw. *Direct Perception Approach* von GIBSON [39] [38] und LEE [63] besagt, dass ein Berechnen der TTC nicht nötig ist, da der Beobachter die relevanten Informationen direkt aus den visuellen Feldern für optischen Fluss erhält. LEE zeigte mathematisch den Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit und der Ausdehnung des retinalen Abbildes und der TTC. Der Kehrwert der Ausdehnungsgeschwindigkeit, bezeichnet als *tau* (τ), bestimmt direkt die TTC. TRESILIAN differenzierte hierbei in „global tau“ und „local tau“ [121]. Global tau tritt auf, wenn alle Texturelemente ihre Relation zum Zentrum der Ausdehnung behalten. Dies tritt typischerweise dann auf, wenn der Beobachter auf ein Ziel zufährt. Findet die Ausdehnung nur in einem bestimmten Teil des Sichtfeldes statt, beispielsweise wenn ein Fahrzeug auf den Beobachter zufährt, spricht man vom local tau. HOFFMAN & MORTIMER legen nach einem videobasierten Probandenversuch die Wahrnehmungsschwelle für das Erkennen einer Annäherung bei einer Ausdehnung von $0,17^\circ$ Blickwinkel/Sekunde fest und bestätigen damit HOFFMANS frühere Ergebnisse [53]. Bei einem Annäherungsvorgang von hinten sind die Annäherungsgeschwindigkeiten kleiner als die absoluten Geschwindigkeiten von Zielfahrzeug und Ego-Fahrzeug. Dadurch ergibt sich in solchen Fällen ein im Verhältnis zum local tau bedeutenderes global tau.

Die TTC wird von menschlichen Fahrern nach GROEGER generell auf 120% bis 140% ihres tatsächlichen Wertes geschätzt. Das heißt, die Kritikalität bestimmter Annäherungssituationen wird unterschätzt. Laut GROEGER sind bestätigte Faktoren, die das Ausmaß des Unterschätzens der TTC beeinflussen, die Annäherungsgeschwindigkeit und Betrachtungsdauer [42]. Diese Faktoren beeinflussen das global tau, als auch das local tau. Die Genauigkeit der Schätzung ist laut HANCOCK & MANSER bei einer radialen Annäherung am höchsten [48]. Alter [108] [113], Fahrerfahrung [17] und Geschlecht werden als weitere Faktoren genannt. Der Einfluss des Geschlechts ist umstritten. Einige Experimente kommen zu dem Schluss, dass Frauen die TTC signifikant schlechter schätzen als Männer [48], während andere [114] diesen Effekt nicht nachweisen konnten. Ob die Erfahrung einen Effekt auf die TTC-Schätzung hat, ist ebenfalls umstritten. So fanden unter anderem RECARTES & NUNES [100] heraus, dass unerfahrene Fahrer die TTC genauer schätzen, wohingegen CAVALLO & LAURENT [17] den gegenteiligen Effekt dokumentieren und bei erfahrenen Fahrern eine höhere Genauigkeit in der Schätzung vermuten.

In einer bei der AUDI AG verfassten Diplomarbeit versucht KIENAST anhand eines Fahrversuchs mit 20 Versuchspersonen mehrere Hypothesen zu klären, die sich aus der laufenden Diskussion ergeben [57]. Die Versuchsteilnehmer sollten bei einer Fahrt auf der Autobahn mit Hilfe eines Fingertasters den Zeitpunkt markieren, ab wann sie aufgrund eines anderen Fahrzeugs auf der linken Nachbarspur keinen Spurwechsel mehr beginnen würden. Die erste Hypothese, formuliert in Anlehnung an die Argumentation aus SIDAWAY ET AL., lautet: Es gibt keinen Zusammenhang zwischen dem Zeitpunkt des Drückens des Fingertasters (dieser Zeitpunkt markiert die subjektive TTC-Schwelle) und der Annäherungsgeschwindigkeit. In einem Fahrversuch im normalen Autobahnverkehr betrachtet der Fahrer den Spiegel in der Regel für maximal 2 Sekunden. Zusätzlich muss er natürlich noch den Verkehr vor sich im Auge behalten. Die kurze Betrachtungsdauer macht es schwierig, eine brauchbare Schätzung von Entfernung und Annäherungsgeschwindigkeit zu erhalten. Zusätzlich wird auf das Fahren so viel kognitive Energie verwendet, dass für das Berechnen der TTC nicht immer genug Ressourcen übrig bleiben. Sind all diese Annahmen korrekt, folgt daraus, dass es keinen Zusammenhang zwischen der Annäherungsgeschwindigkeit und der TTC geben sollte, wenn der Ansatz zum Computational Approach gilt. Die zweite Hypothese besagt, dass Fahrzeugführer mit steigender Erfahrung vorsichtiger fahren. Nach den Ergebnissen von RECARTES & NUNES schätzen erfahrene Fahrer die TTC unter ihrem tatsächlichen Wert ein. Das bedeutet, dass sie, wenn sie bei einem Countdown einen Wert schätzen sollen, früher der Meinung sind, dass der gesuchte Wert erreicht ist. Daher würden erfahrene Fahrer⁵⁹ keinen Spurwechsel mehr beginnen, wenn wenig erfahrene diesen noch für gefahrlos durchführbar halten.

Insgesamt konnten 1.046 Spurwechselsituationen ausgewertet werden. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Annäherungsgeschwindigkeiten zwischen 3,8 km/h und 106,3 km/h bewegen. Der Mittelwert liegt bei 32,2 km/h. Die Standardabweichung beträgt 15,0 km/h.

⁵⁹ Als erfahren galten in diesem Versuch Fahrer mit einer Fahrerfahrung von mehr als 10 Jahren.

Die Entfernung zum Zeitpunkt des Fingertasterdrucks (subjektive Entfernungsschwelle) bewegt sich zwischen 6,5 m und 86,8 m. Der Mittelwert liegt bei 37,4 m, die Standardabweichung hat einen Wert von 14,00 m. Bild 51 zeigt die ausgewerteten Spurwechselsituationen. Jeder Punkt steht für ein Spurwechselereignis. Die Ergebnisse zeigen, dass die Distanz, ab der die Probanden die Spur nicht mehr wechseln würden, im Schnitt linear mit der Relativgeschwindigkeit zunimmt. Zusätzlich ist eine Kollisionslinie eingefügt. Ab dieser Entfernung ist trotz vorausgesetzter schneller Reaktion und Vollbremsung des schnelleren Fahrzeugs auf der Zielspur keine Kollision mehr zu verhindern. Für die Berechnung wird eine Reaktionszeit von 1 Sekunde und für die Vollbremsung ein Verzögerungswert von minus $7,5 \text{ m/s}^2$ angenommen. Einige Ereignisse unter der Kollisionslinie machen deutlich, dass die Fahrer durchaus nicht selten den Abstand oder die Geschwindigkeit herannahender Fahrzeuge falsch einschätzen und die Spur so spät wechseln würden, so dass eine Kollision nicht mehr zu vermeiden wäre. Dies ist einer der Gründe, welche den Einsatz eines Querführungsassistenten außerordentlich sinnvoll erscheinen lassen.

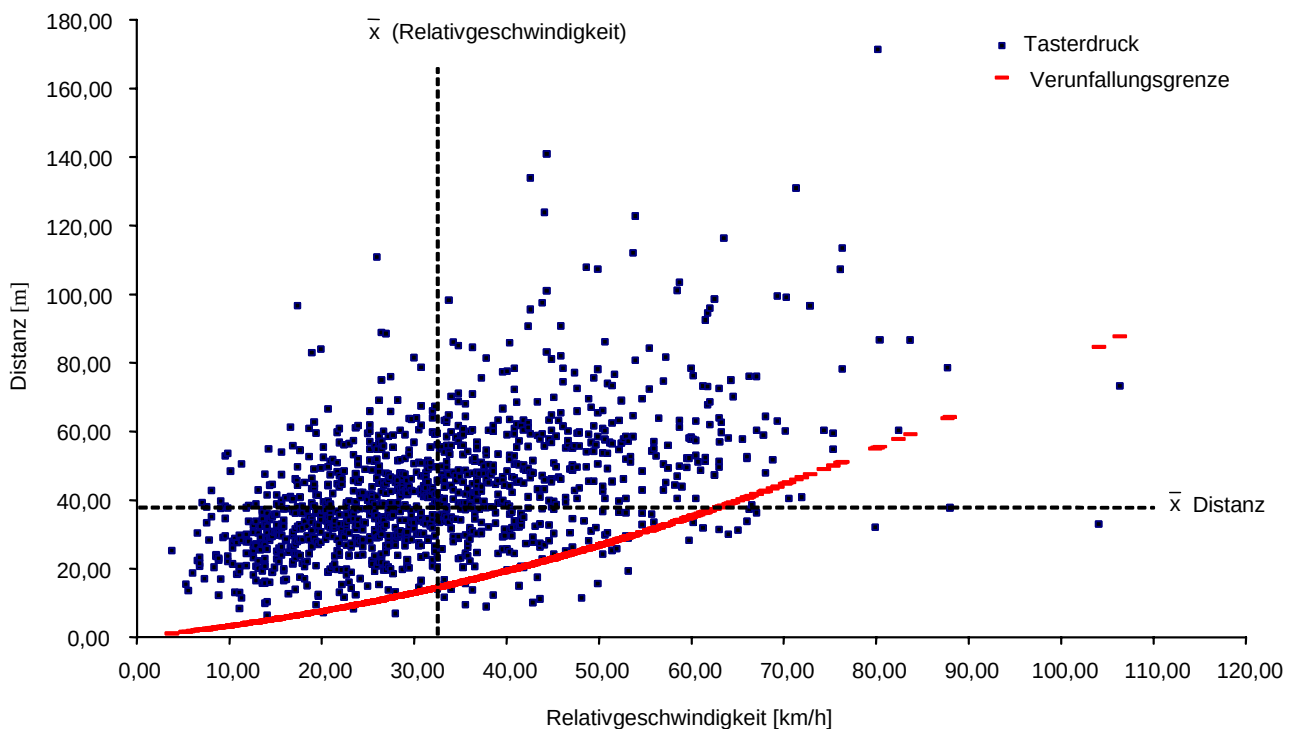


Bild 51: Verteilung verschiedener Spurwechselereignisse hinsichtlich Distanz und Differenzgeschwindigkeit zum nachfolgenden Fahrzeug

Die statistische Auswertung und anschließende Interpretation der Daten zeigt, dass die Annäherungsgeschwindigkeit die TTC-Schätzung deutlich stärker beeinflusst als die Entfernung. Es gibt damit einen statistisch signifikant nachweisbaren Zusammenhang zwischen Annäherungsgeschwindigkeit und subjektiver TTC-Schwelle. Interessanterweise konnte nachgewiesen werden, dass bei hohen Annäherungsgeschwindigkeiten die TTC-Schwelle deutlich niedriger ist als die als durchschnittlich angenommene Gesamtdauer eines Spurwechsels (5,5 Sekunden). Bei niedrigen Annäherungsgeschwindigkeiten zeigt

die TTC wiederum deutlich höhere Werte. Die Arbeit von KIENAST weist zudem den Sehwinkelzuwachs als besten Prädiktor für menschliche TTC-Schätzungen aus und kann damit die These vom Ecological Optics Approach stützen. Die Versuche zeigen weiterhin, dass die Entfernungsschwelle und die subjektive TTC-Schwelle durch die Fahrerfahrung hoch signifikant beeinflusst werden. Erfahrene Fahrer schätzen die Entfernung, als auch die TTC weit höher ein als wenig erfahrene Fahrer. Dieser Effekt tritt allerdings bei hohen Annäherungsgeschwindigkeiten nicht mehr so stark in Erscheinung. Damit konnte die Hypothese, dass erfahrene Fahrer vorsichtige Einschätzungen liefern als wenig erfahrene, bestätigt werden.

6.2.1.3 Aktionsplanung beim absichtlichen Spurwechsel

Aufbauend auf den vorstehend vorgestellten Erkenntnissen soll der Fahrer in Gefahrensituationen eine Unterstützung erfahren, indem die Gefahrenbeurteilung beim Spurwechsel durch einen dynamischen Warnbereich auf Basis der TTC geregelt wird. Dieser ist anhängig von der Relativgeschwindigkeit zwischen dem eigenen, spurwechselnden Fahrzeug und dem Fahrzeug auf der Zielspur sowie von dessen Abstand. Der dynamische Warnbereich beginnt am Fahrzeugheck und weitet sich je nach Relativgeschwindigkeit des Fahrzeugs nach hinten aus. Das im Folgenden verwendete Warnkriterium für die Annäherungswarnung geht davon aus, dass sich der Fahrer auf der Zielspur kooperativ verhält. Gelingt es diesem nicht, nach der Bremsung (noch zu bestimmender) Verzögerung in gewisser (noch zu bestimmender) Entfernung hinter dem spurwechselnden Fahrzeug (Ego-Fahrzeug) die Annäherungsgeschwindigkeit von 0 m/s zu erreichen, wird eine Reaktion des Systems eingeleitet.

Die Länge des dynamischen Warnbereichs setzt sich aus den Abschnitten $s(\text{Reaktion})$, $s(\text{Komfortbremsung})$ und $s(\text{Sicherheit})$ zusammen (siehe Bild 52).

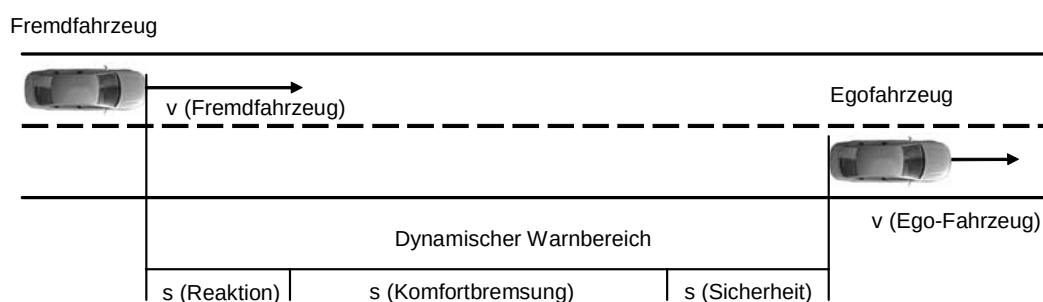


Bild 52: Dynamischer Warnbereich

Die Strecke $s(\text{Reaktion})$ beschreibt die Strecke, die das Fremdfahrzeug zurücklegt, bis dessen Fahrer den Spurwechselwunsch des Ego-Fahrzeugs erkennt und darauf zu reagieren beginnt. Anschließend muss er mit einem bestimmten Verzögerungswert seine Geschwindigkeit auf die des Ego-Fahrzeugs angleichen, um eine Kollision zu vermeiden. Dabei wird die Strecke $s(\text{Komfortbremsung})$ zurückgelegt. Haben sich die Geschwindigkeiten

der beiden Fahrzeuge angeglichen, sollte noch ein gewisser Sicherheitsabstand zwischen beiden Fahrzeugen bestehen. Die Ergebnisse des voranstehenden Kapitels zeigen, dass es einen Abstand hinter dem Fahrzeug gibt, der beim Spurwechsel in jedem Fall frei bleiben muss. Dieser wird mit der Strecke $s(\text{Sicherheit})$ beschrieben. Der dynamische Warnbereich kann als die Summe dieser drei Streckenabschnitte berechnet werden.

$$DWB = s(\text{Reaktion}) + s(\text{Komfortbremsung}) + s(\text{Sicherheit}) \quad (\text{Formel 2})$$

$$DWB = (v_{\text{relativ}} \cdot t_{\text{Reaktion}}) + \left(\frac{v_{\text{relativ}}^2}{2 \cdot a_{\text{Komfort}}} \right) + d_{\text{sicher}} \quad (\text{Formel 3})$$

$$DWB = \left(\frac{1}{2 \cdot a_{\text{Komfort}}} \right) \cdot v_{\text{relativ}}^2 + t_{\text{Reaktion}} \cdot v_{\text{relativ}} + d_{\text{sicher}} \quad (\text{Formel 4})$$

v_{relativ} = Relativgeschwindigkeit in m/s

t_{Reaktion} = Reaktionszeit in s

a_{Komfort} = Verzögerung der Komfortbremsung in m/s²

d_{sicher} = Sicherheitsabstand in m

Die Reaktionsschnelligkeit wird durch die Reaktionszeit ausgedrückt. Eine Zeit von 0,8 Sekunden wird häufig als erreichbar angesehen. Tatsächlich gilt dieser Wert jedoch nur, wenn auf eine einzelne, klare Aufforderung reagiert werden muss, beispielsweise auf das Bremslicht des Vordermanns. Ist die Aufforderung schwach oder kommt eine notwendige Blickzuwendung oder gar die Notwendigkeit einer Auswahl aus mehreren Entscheidungsmöglichkeiten hinzu, kann sich die Reaktionszeit mehr als verdoppeln. Nach Ergebnissen von EHMANN & HOCHSTÄDTER liegt die Reaktion im Falle des Spurwechsels eines langsameren voran fahrenden Fahrzeugs auf die eigene Fahrspur im Bereich zwischen 1 bis 2 Sekunden. Dies gilt allerdings unter der Voraussetzung, dass der Fahrer kooperationsbereit ist, also dem langsam fahrenden Fahrzeug den Spurwechsel ermöglichen will und das spurwechselnde Fahrzeug seine Spurwechselabsicht in irgendeiner Form, z.B. durch die Betätigung des Blinkers deutlich macht. Wird die Spurwechselabsicht nicht eindeutig indiziert, ist die Wahrscheinlichkeit eines kooperativen Verhaltens des Fahrers von dem Fahrzeug auf der Zielspur deutlich geringer und wird zudem später erkannt. Der Fahrer reagiert im Allgemeinen auf diesen nicht induzierten Spurwechsel deutlich langsamer. Es wurden Reaktionszeiten bis zu 7 Sekunden gemessen [28].

Die Kooperationsbereitschaft des Fahrzeugs auf der Zielspur hat einen großen Einfluss auf die negative Verzögerung, die das Fremdfahrzeug bereit ist einzugehen, um den Spurwechsel des Ego-Fahrzeugs zu ermöglichen. In SPARMANN wird die zumutbare Verzögerung als diejenige angenommen, die nur durch Gaswegnehmen ohne Betätigung der Bremse erreicht werden kann. Diese liegt im Mittel bei -1,25m/s² [115]. In EHMANN wurde im Rahmen einer Versuchsreihe das kooperative Verhalten des Fahrzeugs auf der Zielspur untersucht. Das Entgegenkommen der einzelnen Fahrer ist von deren Eigenschaften geprägt und fällt demzufolge unterschiedlich aus. Die Möglichkeit, anderen Fahrzeugen

einen Spurwechsel zu ermöglichen, stellt für die Aufrechterhaltung des Verkehrsflusses eine wichtige Voraussetzung dar. Zunächst bietet jeder angezeigte Spurwechsel einen Anlass zur möglichen Rücksichtnahme. Da das Entgegenkommen immer auch eine Verzögerung und damit einen Nachteil bedeutet, ist eine Abstufung der Reaktion anzunehmen, abhängig davon, wie notwendig dem Fahrer auf der Zielspur der Spurwechsel erscheint. Bei den Messfahrten stellte sich heraus, dass bei deutlicher Ankündigung des Wechselwunsches die Fahrer auf der Zielspur bereit sind, durch Verzögern zu kooperieren. Eine Voraussetzung für diese Bereitschaft war, dass die Abbremsung einen bestimmten Wert nicht überschritt. Dieser liegt meist im Bereich der Motorbremsung. In Situationen, in denen die Spurwechselmotivation klar durch die Verkehrssituation oder bauliche Hindernisse erkennbar ist, wurde eine Durchschnittsverzögerung von $2,5 \text{ m/s}^2$ beobachtet.

Im fließenden Verkehr können kooperative Fahrer den Spurwechselwunsch anderer Fahrer anhand des Verhältnisses der Kollisionszeiten des Spurwechselnden zu seinem Bezugsfahrzeug vorne auf der Start- und hinten auf der Zielspur vermuten. Daher wird das Verhältnis der TTC nach vorne bzw. nach hinten als Kriterium für die Kooperationsbereitschaft verwendet. Dies gilt allerdings nur, wenn der Spurwechselnde auf seiner Ausgangsspur behindert würde, so dass die Kollisionszeit unter 5 Sekunden läge. Für diese Überholvorgänge nach dem TTC-Kriterium konnten Verzögerungswerte von ca. $1,5 \text{ m/s}^2$ beobachtet werden. Falls der Grund eines Spurwechsels für die Nachfolgenden nicht ersichtlich ist, kann lediglich mit einem geringen Verzögerungswert gerechnet werden. Es wurden Werte von $0,5 \text{ m/s}^2$ gemessen. Wenig Kooperationsbereitschaft zeigen Fahrer auf der Zielspur, die selbst keine Folgefahrzeuge haben. Dann wären die eigenen Nachteile bei einer Bremsung wesentlich größer als die Nachteile des spurwechselnden Fahrzeugs, das erst hinter ihm einscheren könnte. Bei allen beschriebenen Situationen wurden individuelle Verhaltensgrenzen mit einer Streuung von $\pm 0,5 \text{ m/s}^2$ berücksichtigt [27].

Die Ergebnisse in Bild 51 zeigen zusätzlich: Die Entfernungsschwelle ist in keinem Fall kleiner als 6,5 m. Es gibt damit einen Bereich hinter dem Fahrzeug, der bei einem Spurwechsel frei bleiben muss. Die Größe dieses Bereichs ist unabhängig von der Annäherungsgeschwindigkeit des Fahrzeugs auf der Zielspur. Der Bereich endet ungefähr eine knappe Fahrzeuglänge hinter dem Ende des Totwinkelbereichs, der sich wiederum bis zu einer Entfernung von 3 Metern hinter dem eigenen Fahrzeug erstreckt. In der Praxis bedeutet das, dass, sobald das Bild des Fremdfahrzeugs und potentiellen Kollisionspartners fast die Außenkante der Spiegelfläche berührt, der Fahrer keinen Spurwechsel mehr beginnt. Auf dieser Erkenntnis baut das nachfolgend vorgestellte Modell auf. Es soll den Warnzeitpunkt berechnen und somit innerhalb des Querführungsassistenten die Unterstützung im Spurwechselfall sicherstellen. Der Sicherheitsabstand, der nach durchgeführter Geschwindigkeitsanpassung zwischen dem Fahrzeug auf der Zielspur und dem Ego-Fahrzeug übrig bleibt, sollte damit mindestens knapp 7 Meter betragen. Im Rahmen eines Fahrversuchs mit 10 Personen und knapp 1.000 zu bewertenden Situationen wurden verschiedene Werte für den Sicherheitsabstand $s(\text{Sicherheit})$ untersucht [36]. Als Werte wurden Abstände von 5, 10, 15 und 20 Metern in der Berechnung des dynamischen Warnbe-

reichs berücksichtigt. Dazu sollte für jedes Warnkriterium in den einzelnen Überholsituationen eine Einschätzung darüber abgegeben werden, ob die Warnung zu früh, rechtzeitig oder zu spät dargeboten wurde. Nach Abschluss der Messfahrten ergab die Auswertung, dass annähernd 2/3 der Befragten (64%) einen großen Sicherheitsabstand von 20 m bevorzugen. Mit dieser Einstellung empfinden nur 13% den Warnzeitpunkt als zu früh, 23% als zu spät.

6.2.2 Das unbeabsichtigte Spurverlassen

Der Querführungsassistent hat zum Ziel, ein mögliches Verlassen der Fahrspur frühzeitig zu detektieren und den Fahrer rechtzeitig auf das Abkommen von der Fahrspur aufmerksam zu machen. Auch ein korrigierender Eingriff in den Fahrprozess ist denkbar.

Bei der Detektion des ungewollten Fahrspurverlassens können zwei Ansätze verfolgt werden. Beim abstandsorientierten Ansatz wird der seitliche Abstand des Fahrzeugs zum Spurrand berechnet. Unterschreitet dieser einen bestimmten Schwellenwert, soll eine Systemreaktion eingeleitet werden. Dieser Wert wird als *Distance to Line Crossing (DLC)* bezeichnet. Als zeitbasierter Ansatz zur Spurverlassenswarnung gilt hingegen die *Time to Line Crossing (TLC)*, bei der die Zeit bis zum Spurübertritt berechnet werden kann.

6.2.2.1 Distance to Line Crossing (DLC) und Time to Line Crossing (TLC)

Die Berechnung der DLC erfolgt nach Formel 5. Der Wert wird in dieser Formel unabhängig von der Fahrbahnseite immer positiv.

$$DLC = \frac{B_{Spur}}{2} - \left(\frac{B_{Fzg}}{2} + |d| \right) \quad (Formel 5)$$

DLC = Lateraler Abstand der Fahrzeugaußenkante zur Fahrbahnmarkierung in m

B_{Spur} = Fahrspurbreite in m

B_{Fzg} = Fahrzeugbreite in m

d = Querabweichung/ Ablage in m

Neben dem abstandsorientierten Ansatz kann ein zeitbasierter Ansatz verwendet werden. Dieser berechnet die Zeit, bis zum Überfahren der Spurmarkierung (unveränderte Fahrtrajektorie vorausgesetzt). Dieses Kriterium wird als Time to Line Crossing bezeichnet. Dabei geht man davon aus, dass Geschwindigkeit, Querabweichung, Gierwinkelfehler und Spurbreite konstant bleiben. Das zugrunde liegende Fahrbahnmodell beruht meist auf einem linearen Ansatz. Das bedeutet, Fahrbahn und Fahrtrichtungsverlauf werden als Gerade betrachtet. Der Nachteil bei der Verwendung des linearen Ansatzes liegt in der teils fehlerbehafteten Berechnung der TLC in Kurvenbereichen. Dort geht die Berechnung von einer geraden Strecke aus und kann so besonders beim Schneiden von Kurven durch einen sportlichen Fahrer zu Fehlwarnungen führen.

Mit Hilfe des Gierwinkelfehlers $\Delta\Psi$ kann durch Formel 6 die Strecke S berechnet werden, welche noch zurückzulegen ist, bevor die Fahrbahnmarkierung überfahren wird.

$$S = \frac{DLC}{\sin(\Delta\Psi)} = \frac{\frac{1}{2} \cdot (B_{Spur} - B_{Fzg}) - d \cdot \text{sign}(\Delta\Psi)}{\sin(\Delta\Psi)} \quad (\text{Formel 6})$$

S = Strecke in Fahrtrichtung bis zum Verlassen der Fahrspur in m
 DLC = Lateraler Abstand der Fahrzeugaußenkante zur Fahrbahnmarkierung in m
 $\Delta\Psi$ = Gierwinkelfehler in rad
 B_{Spur} = Fahrspurbreite in m
 B_{Fzg} = Fahrzeugbreite in m
 d = Querabweichung/ Ablage in m

Nun lässt sich durch Division der Strecke S mit der Fahrzeuggeschwindigkeit v der aktuelle Wert für die TLC berechnen (vgl. Formel 7).

$$TLC = \frac{S}{v} = \frac{\frac{1}{2} \cdot (B_{Spur} - B_{Fzg}) - d \cdot \text{sign}(\Delta\Psi)}{\sin(\Delta\Psi) \cdot v} \quad (\text{Formel 7})$$

TLC = Zeit bis zum Verlassen der Fahrbahn in s
 v = Fahrzeuggeschwindigkeit in km/h

Bild 53 zeigt den abstands- und den zeitbasierten Ansatz, sowie die für die Berechnung notwendigen Größen.

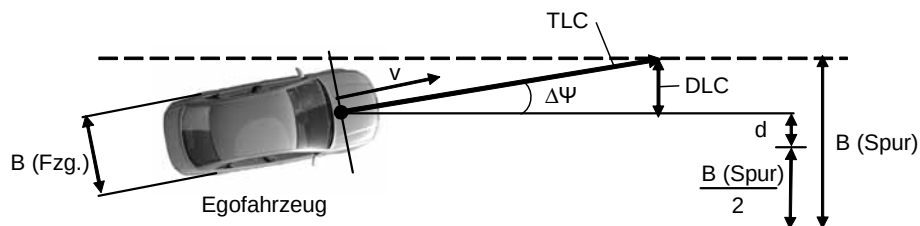


Bild 53: Abstands- und zeitbasierter Ansatz zur Spurverlassenserkennung

6.2.2.2 Warnzeitpunktberechnung beim ungewollten Spurverlassen

Wie wichtig die TLC zur Erkennung des ungewollten Spurverlassens und als Maß zur Einschätzung der Fahrerleistungsfähigkeit und Aufmerksamkeit ist, wird in zahlreichen Quellen betont. Nach Ansicht von ZWAHLEN ET AL. ist „one important measure of driver perform-

ance (...) the amount of which an automobile's path deviates from the center of the lane“⁶⁰ [132]. Eine Spurverlassenswarnung auf Basis der TLC passt sich besser der aktuellen Fahrsituation an. Die Berechnung des Gierwinkelfehlers aus den Videosensorikdaten ist nicht immer konsistent, ein Einfluss auf die Berechnung des TLC ist damit nicht immer auszuschließen. Dem Fahrer gegenüber äußert sich das in nicht immer gleich bleibenden Warn- oder Eingriffszeitpunkten. Der Eindruck des Bedieners von der Transparenz des Systems leidet. Der Vorteil der DLC-Variante ist: Sie ist unabhängig von der Fahrzeuggeschwindigkeit. Sie reagiert in allen Situationen gleich und ist somit einfacher zu verstehen. Bei alleiniger DLC-Variante können ausgelöste Warnungen aber je nach Geschwindigkeit als nicht rechtzeitig empfunden werden. Bei der TLC-Variante ist eine langsame Annäherung (ohne Warnungsauslösung) an die Fahrspurmarkierung möglich, wenn der Gierwinkelfehler sehr gering ist. Aus den genannten Gründen ist eine Kombination der beiden Ansätze die beste Wahl. Vor- und Nachteile des abstands- wie des zeitbasierten Ansatzes finden sich in Tabelle 27.

Tabelle 27: Abstands- und zeitbasierter Ansatz im Vergleich

	Eingangsgrößen	Vorteile	Nachteile
Zeitbasierter Ansatz (TLC)	Querabweichung Spurbreite Gierwinkelfehler Geschwindigkeit	Wenig Eingangsgrößen Einfache Berechnung „Situatives“ Warnverhalten	Überschätzung bzw. Unterschätzung der TLC in Kurvenbereichen Empfindlichkeit gegen Gierwinkelfehleroffset
Ortsbasierter Ansatz (DLC)	Querabweichung Spurbreite	Wenig Eingangsgrößen Einfache Berechnung Hohe Transparenz für den Fahrer	Keine Berücksichtigung der Zeitkomponente Fehlwarnungen bei außermittigem Fahrstil

6.3 Fahrversuch zur Schnittstellenmodalität

Der Querführungsassistent kann vereinfacht (unter Vernachlässigung möglicher Synergievorteile, die sich aus der Integration ergeben) als eine Kombination verschiedener Teilasistenzsysteme betrachtet werden. So führt er die Systeme zur Spurverlassenswarnung und zur Spurwechselassistentz (und ggf. Spurhalteunterstützung) in einem Gesamtsystem zur Unterstützung des Fahrers in der Querführung zusammen. Bisher wurden die einzelnen Systemfunktionalitäten in fast allen wissenschaftlichen Abhandlungen getrennt behandelt. Es wurden zahlreiche Ansätze entwickelt, welche Signale am besten dafür geeignet wären, einmal im Falle eines ungewollten Spurverlassens (z.B. Lenkmoment, Lenk-

⁶⁰ Übersetzung: „Eine wichtige Messgröße der Leistungsfähigkeit des Fahrers ist die Abweichung der Fahrtrajektorie von der Mitte der Fahrspur.“

radvibration, Nagelbandrattern, etc.) und einmal beim gefährlichen Spurwechsel (z.B. Außenspiegelanzeige, Lenkmoment) zu warnen. Die Zusammenführung der Teilsysteme zu einem Querführungsassistenten wirft eine neue Frage auf. Muss das System nach wie vor bei den getrennten Warnsituationen für Spurhalten und Spurwechsel unterschiedliche Signale an den Fahrer übermitteln (*multimodale Systemauslegung*) oder ist es möglich, über eine einheitliche Mensch-Maschine-Schnittstelle (*unimodale Systemauslegung*) mit dem Fahrer zu interagieren? Im Rahmen eines Fahrversuchs soll diese Frage untersucht werden.

6.3.1 Versuchsziel

Der Querführungsassistent wurde im Rahmen dieses Versuchs im Versuchsträger mit einer unimodalen, als auch mit einer multimodalen Auslegung der Mensch-Maschine-Schnittstelle umgesetzt. Tabelle 28 beschreibt beide Systemausprägungen.

Tabelle 28: Unimodale und multimodale Systemausprägung im Vergleich

Systemausprägung U (unimodal)	Systemausprägung M (multimodal)	
korrigierendes Lenkmoment	korrigierendes Lenkmoment	Warnung bei unbeabsichtigtem Fahrspurverlassen (Spurverlassenswarnung)
	optisches Signal über Außenspiegelanzeige	Warnung vor Gefährdung beim gewollt initiierten Spurwechsel (Spurwechselassistent)

In der unimodalen Ansteuerung der Mensch-Maschine-Schnittstelle („Systemausprägung U“) wird dem Fahrer die Warnung bei vorliegender Gefährdung während eines gewollt initiierten Spurwechsel genauso wie im Falle eines unbeabsichtigtem Fahrspurverlassen über ein korrigierendes Lenkmoment dargeboten. In der multimodalen Systemauslegung („Systemausprägung M“) wird der Fahrer bei unbeabsichtigtem Spurverlassen zwar wiederum haptisch über ein Lenkmoment gewarnt, über eine Gefährdung während eines Spurwechsels durch ein Fremdfahrzeug auf der Zielspur wird er aber über eine Anzeige im Außenspiegel informiert. Unimodal bedeutet demnach die Informationsweitergabe der Systemreaktionen an den Fahrer über nur eine (in diesem Fall haptische) Schnittstelle, als multimodal gilt in vorliegendem Versuchsdesign die Informationsweitergabe über den haptischen und über den visuellen Kanal.

Die Systemfunktionalität bleibt unabhängig von der Ausprägung der Mensch-Maschine-Schnittstelle gleich. Das System gibt dann eine Warnung an den Fahrer weiter, wenn dieser den Blinker betätigt, sich aber auf der Zielspur ein anderes Fahrzeug befindet, mit dem es zu einer Kollision kommen könnte (Spurwechselassistent). Auch das unbeabsichtigte

Spurverlassen des Fahrzeugs führt zu einer Warnung des Systems (Spurverlassenswarner), sobald das Fahrzeug im Begriff ist, die Spurmarkierung zu übertreten.

6.3.2 Hypothesenbildung

In der Untersuchung sollte das Gesamtsystem im realen Fahrversuch durch eine ausreichend große Anzahl an Versuchspersonen hinsichtlich ausgewählter subjektiver wie objektiver Kriterien bewertet werden. Der Versuch hat zum Ziel, die vom Fahrer empfundene Beanspruchung zu eruieren. Dies gilt auch im Hinblick auf deren Veränderung im Vergleich von Fahrten mit und ohne Systemunterstützung. Die Hypothese lautet:

Hypothese 6.3-1: Der Querführungsassistent verändert die Beanspruchung des Fahrers im Vergleich zu Fahrten ohne Systemunterstützung nur unwesentlich.

Im Rahmen eines weiteren Fragekomplexes soll das Systemverständnis als Hinweis auf Transparenz, Intuitivität und Erlernbarkeit des Systems näher betrachtet werden.

Hypothese 6.3-2: Der Bediener des Querführungsassistenten ist schon nach kurzer Kennenlernphase auch ohne Vorinformationen und Erklärungen in der Lage, sich eine Vorstellung von der Systemfunktionalität zu machen.

Zusätzlich sollen etwaige Auswirkungen des Systems auf das individuelle Fahrverhalten identifiziert werden.

Hypothese 6.3-3: Die Unterstützung durch den Querführungsassistenten verändert das Normalfahrverhalten der einzelnen Fahrer beim Spurhalten wie beim Spurwechsel nur unwesentlich.

Abschließend sollte der generelle Eindruck der Probanden zum System und zu den Systemkomponenten eingefangen werden.

Hypothese 6.3-4: Der Querführungsassistent wird von den Bedienern in wichtigen Kriterien der Akzeptanzmessung positiv bewertet.

Als ein übergeordnetes Ziel soll der Versuch, wie in der Einleitung zu diesem Kapitel beschrieben, einen Aufschluss darüber geben, ob unterschiedliche Ausprägungen der Mensch-Maschine-Schnittstelle einen Einfluss auf die vorstehend vorgestellten Bewertungskriterien und die daraus abgeleiteten Hypothesen hat.

Hypothese 6.3-5: Bei Darbietung der Systemsignale des Querführungsassistenten über eine unimodale Schnittstelle (Lenkmomente) sind bei gleicher Grundfunktionalität im Vergleich zu einer multimodalen Schnittstelle keine negativen Auswirkungen auf die Fahrerbeanspruchung, auf das Fahrverhalten, auf das Systemverständnis und auf die Akzeptanz zu erwarten.

6.3.3 Methodik

Die verschiedenen Versuchsziele wurden in den Rahmen eines experimentellen Fahrversuchs integriert. Die Untersuchung fand im Fahrzeug auf öffentlichen Straßen statt, um das Datenmaterial unter realistischen Fahrbedingungen zu gewinnen. Die Tabelle 29 zeigt die Methoden zur Gewinnung und Auswertung der verschiedenen Bewertungskriterien im Überblick. Die Erklärung der Methoden und deren spezielle Anwendung im Rahmen dieses Fahrversuches wird mit den nachfolgend dargestellten Ausführungen zu den Versuchsergebnissen verbunden.

Tabelle 29: Methoden zur Gewinnung und Auswertung von verschiedenen Bewertungskriterien

Bewertungskriterium	Methode
Beanspruchungsempfinden (Hypothese 6.3-1)	Beanspruchungsbefragung der Versuchspersonen nach NASA TLX im Vergleich zwischen Fahrt ohne und mit Systemunterstützung
Systemverständnis und Erlernbarkeit (Hypothese 6.3-2)	Fragebogen an Versuchspersonen nach kurzer Explorationsfahrt mit Systemunterstützung ohne vorherige Aufklärung über Systemfunktionalität
Auswirkungen auf das individuelle Fahrverhalten (Hypothese 6.3-3)	Vergleich verschiedener, während der Fahrt aufgezeichneter fahrerindividueller Daten nach Fahrt mit und ohne Systemunterstützung
Eindruck des Fahrers vom System (Hypothese 6.3-4)	Fragebogen an Versuchspersonen nach Normalfahrt mit Systemunterstützung
Unterschied zwischen multimodaler und unimodaler Schnittstelle (Hypothese 6.3-5)	Auswertung des Fragebogens hinsichtlich der Schnittstellenmodalität, unter deren Bezug die Versuchspersonen die Fragen beantwortet haben

6.3.4 Versuchspersonen

Insgesamt nahmen 16 Personen an den Versuchen teil. Die Versuchspersonen waren Mitarbeiter der AUDI AG. Es wurde zwingend darauf geachtet, dass die Versuchspersonen über keinerlei Vorkenntnisse über das in diesem Versuch präsentierte Fahrerassistenzsystem oder ein ähnliches System verfügten, damit sie unbeeinflusst die Fragen zum Systemverständnis beantworten konnten. Die ausgewählte Personengruppe entsprach in ihren Fähigkeiten weitgehend denen von Normalfahrern bei allerdings möglicherweise über-

durchschnittlich technischem Wissen. Die Tabelle 30 zeigt weitere Eigenschaften der Stichprobe. Als erfahrene Fahrzeugführer galten in dieser Untersuchung die Versuchspersonen, die über eine Fahrerfahrung von mindestens 8 Jahren verfügten.

Tabelle 30: Eigenschaften der Versuchsprobandengruppe

Charakteristik	Wertebereich	
Anzahl Versuchspersonen	16 Personen	
Geschlecht	weiblich 6 Personen	männlich 10 Personen
Alter	durchschnittlich 29,8 Jahre ($s = 9,7$ Jahre) im Bereich zwischen 21 und 51 Jahren	
Jährliche Fahrleistung	durchschnittlich 19.000 km ($s = 11.300$ km)	

6.3.5 Versuchsaufbau

Als Versuchsfahrzeug diente der in Kapitel 5 vorgestellte Versuchsträger. Das Fahrzeug war mit dem Querführungsassistenten ausgestattet. Die Betätigung des Blinkers war alleiniges Kriterium für den Fahrerwunsch zum Spurwechsel, ohne Blinkerbetätigung ging das System beim Abkommen aus der Spur von einem ungewollten Fall aus. Diese Situation wurde auf Basis des in Abschnitt 6.2.2.1 vorgestellten ortsbasierten Ansatzes dem Fahrer über ein Lenkmoment angezeigt, wenn das Fahrzeug bis auf 10 cm an die Fahrbahnmarkierung herantritt, ohne dass der Fahrer den Blinker betätigt, um so andernfalls seine Absicht zum Verlassen der Fahrspur anzuzeigen. Das Lenkmoment, das sowohl in Systemausprägung U als auch in Systemausprägung M präsentiert wurde, zeigte dabei immer in Richtung der Fahrspurmitte, hatte eine Größe von 1,5 Nm und wurde für 1 Sekunde dargestellt. In der Systemausprägung M wurde der Fahrer bei Gefährdung während eines Spurwechsels über eine rot blinkende, überschwellige Anzeige im Außenspiegel informiert. Als überschwellig werden Signale bezeichnet, die auch bei Darbietung im peripheren Sichtfeld des Fahrers zu einer Blickzuwendung führen. Die Anzeige blinkte dazu mit voller möglicher Leuchtstärke in einer Frequenz von 5 Hz, wenn der Fahrer den Blinker setzte, sich aber auf der Zielspur im Gefährdungsbereich (siehe Kap. 6.2.1.3) ein Fremdfahrzeug befand.

Die Daten der Radarsensoren und die fahrzeuginternen Größen konnten mit Hilfe einer speziellen Softwarelösung ausgelesen, aufgezeichnet und später ausgewertet werden. Zusätzlich wurde eine Kamera zur Beobachtung des Fahrers angebracht. Diese Videodaten wurden später nicht separat hinsichtlich der Blickbewegungen des Fahrers ausgewertet, dienten aber als zusätzliche Informationsquelle während der nachexperimentellen Offline-Auswertung der aufgenommenen Daten.

6.3.6 Versuchsdurchführung

Der Versuch fand auf einer meist dreispurigen Autobahn statt. Jeder Versuchsteilnehmer testete in Begleitung des Versuchsleiters innerhalb von drei Wochen den Querführungsassistenten zweimal, jeweils einmal mit Systemausprägung U und einmal mit Systemausprägung M. Zwischen den zwei Versuchsfahrten lagen für jeden Versuchsteilnehmer mehrere Tage. Ob der Proband zu seinem ersten Versuchstermin mit der Systemausprägung U oder der Systemausprägung M antrat (und bei seinem zweiten Termin dann die jeweils andere Systemausprägung erproben sollte), wurde zufällig variiert.

Jeder Versuchsteilnehmer bewegte insgesamt das Fahrzeug etwa 250 km über einen Zeitraum von jeweils 3,5 Stunden. Über alle 16 Versuchsteilnehmer summiert, ergeben sich so eine Gesamtversuchsstrecke von etwa 4.000 km und eine Gesamtfahrdauer von 56 Stunden.

6.3.7 Versuchsergebnisse zum subjektiven Systemeindruck

6.3.7.1 Subjektives Beanspruchungsempfinden

Die Messung des subjektiven Beanspruchungsempfindens erfolgte in der Untersuchung mit Hilfe einer eindimensionalen Rating-Skala. Die Versuchsteilnehmer hatten nach der Normalfahrt ohne Systemunterstützung, wie auch nach der Normalfahrt mit Systemunterstützung die Aufgabe, ihrem jeweiligen Gesamtbeanspruchungsempfinden auf einer beschrifteten Skala einen Wert zwischen 0 und 220 zuzuordnen. Die Einstufung wurde ihnen dadurch erleichtert, dass bestimmte Skalenwerte beschreibende Attribute trugen⁶¹. Die Auswertung erlaubt einen Vergleich zwischen Normalfahrt mit und ohne Systemunterstützung und gibt so einen wertvollen Hinweis auf die Veränderung der Beanspruchung durch das System.

Die Gesamtbeanspruchung sowohl bei Fahrten ohne das System als auch bei Fahrten mit dem System wird von den Versuchsteilnehmern größtenteils als „kaum anstrengend“ bis „etwas anstrengend“ empfunden. Bild 54 zeigt die durchschnittlichen Beanspruchungswerte bei Fahrten ohne Systemunterstützung und bei Fahrten mit der jeweiligen Systemausprägung U und M. Der rechte Teil der Darstellung entspricht der Messskala, wie sie im Rahmen dieser Untersuchung verwendet wurde.

⁶¹ Auf einer Skala von 0 bis 220 entspricht ungefähr der Skalenwert (SW) 20 = „kaum anstrengend“, SW 40 = „etwas anstrengend“, SW 75 = „einigermaßen anstrengend“, SW 120 = „ziemlich anstrengend“, SW 155 = „stark anstrengend“, SW 190 = „sehr stark anstrengend“, SW 205 = „außerordentlich anstrengend“

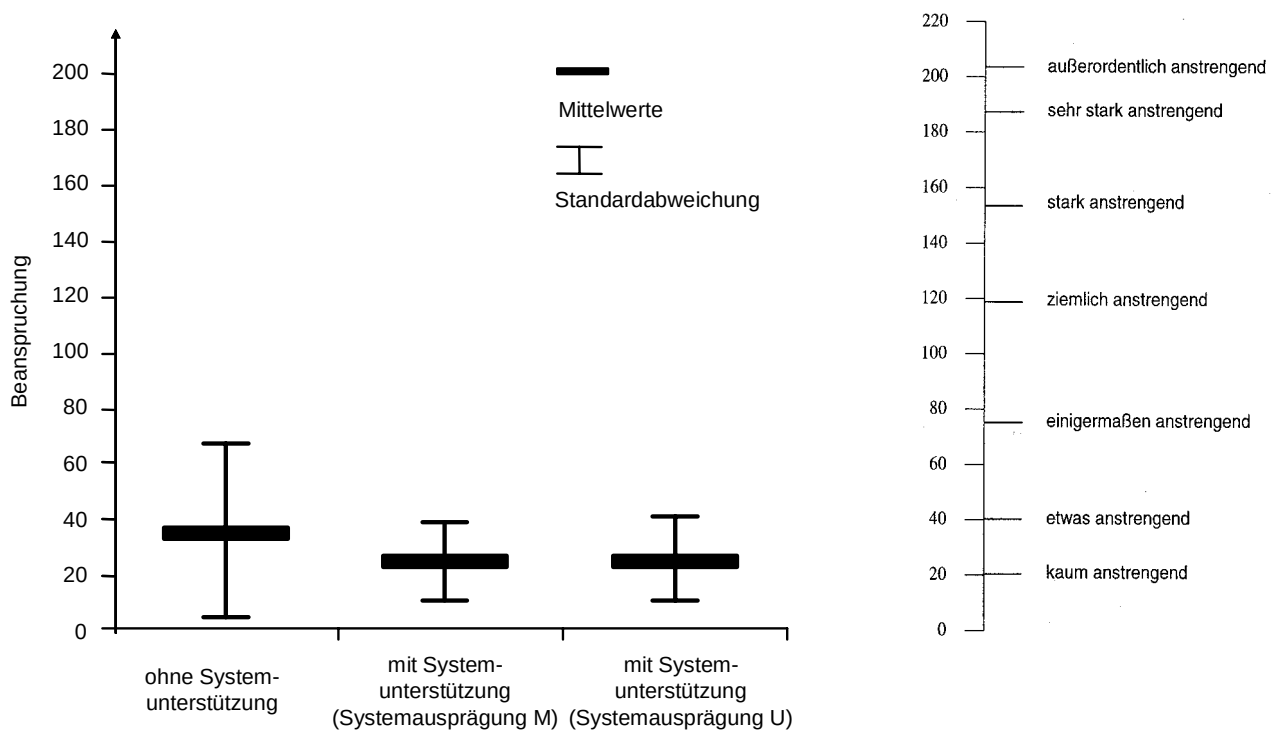


Bild 54: Versuchsergebnisse zur subjektive Beanspruchung der Versuchspersonen

Der Mittelwert der subjektiven Beanspruchungseinschätzung bei Fahrten ohne Systemunterstützung über alle Probanden beträgt 37,3 ($s=31,2$) und bei Fahrten mit Systemunterstützung 27,8 ($s=15,7$). Die Werte bei Normalfahrt mit Systemunterstützung sind dabei erkennbar, aber nicht signifikant niedriger als ohne Unterstützung durch das System. Die Verschiedenartigkeit der Mensch-Maschine-Schnittstelle (Systemausprägung U zu Systemausprägung M) schlägt sich bei der subjektiven Fahrerbeanspruchung nicht signifikant nieder. Der Querführungsassistent verändert in beiden dargebotenen Systemausprägungen die Beanspruchung der Fahrer nach deren Einschätzung kaum. Bei Systemausprägung U beträgt der Mittelwert 28,1 ($s=16,0$), bei Systemausprägung M 27,5 ($s=15,8$). Es kommt weder zu einer signifikanten Entlastung noch zu einer zusätzlichen Beanspruchung des Fahrers durch das System. Das System kann somit als beanspruchungsneutral gelten, da es dem Fahrer keine ungewollte Veränderung des subjektiv empfundenen Beanspruchungsniveaus aufzwingt. Aus der Analyse der Befragungsergebnisse ist demnach weder eine durch das System induzierte Unter- noch eine Überforderung festzustellen. Die Hypothese 6.5-1 kann damit im Rahmen dieses Fahrversuchs nicht eindeutig widerlegt oder unterstützt werden, die Messwerte der Beanspruchungseinschätzung mit und ohne Systemunterstützung stammen nach einem Test nach Kolmogorov-Smirnov mit einer Wahrscheinlichkeit von $p=0,512$ aus derselben Grundgesamtheit.

6.3.7.2 Systemverständnis

Die Frage nach dem Systemverständnis und der Erlernbarkeit des Systems erfolgte an Probanden, die frei von Vorwissen über das System (d.h. ohne Instruktionen und ohne

Vorkenntnisse über das vorliegende oder ein ähnliches System) nach der ersten Explorationsfahrt befragt wurden. Die Versuchsteilnehmer beantworteten dazu acht Fragen, mit denen ihr Verständnis für die unmittelbar vorher dargebotene Funktionalität überprüft werden sollte. Die Fragen beschrieben beispielsweise Fahrsituationen, für die die Befragten die ihrer vorher gewonnenen Erfahrung nach auftretende Systemreaktion angeben sollten. Die Antwort konnte anschließend mit der richtigen Lösung abgeglichen werden und durch die Fehlerrate ein Maß für die Erlernbarkeit des Systems gewonnen werden. Die Beantwortung der Verständnisfragen erlaubt Rückschlüsse auf Transparenz, Intuitivität und Erlernbarkeit des Systems und gilt als wichtiges Mittel zur Beurteilung der Gebrauchssicherheit des Querführungsassistenten.

Die Auswertung der Ergebnisse zeigt, dass die Befragten sich bereits nach der Explorationsfahrt, in der sie ohne Vorkenntnisse selbstständig das System erfahren und erproben konnten, ein sehr genaues Bild von der Systemfunktionalität machen konnten. Trotz der geringen Dauer der Explorationsphase von etwa 30 Min. und der anspruchsvollen Fragestellung wurden von allen Versuchspersonen im Mittel 75,0% ($s=23,3\%$) der Fragen richtig beantwortet. Die unerfahrenen Fahrer beantworten dabei ($x=79,7\%$; $s=21,1\%$) mehr Fragen als die erfahrenen ($x=70,3\%$; $s=25,8\%$), die männlichen Fahrer ($x=83,9\%$; $s=14,5\%$) mehr als die weiblichen ($x=60,4\%$; $s=29,0\%$) richtig. Die Unterschiede verfehlen die Signifikanzgrenze allerdings knapp.

Mit welcher Systemausprägung dem Proband das System bekannt gemacht wurde, schlägt sich nachweisbar nieder. Die Fahrer, die den Versuch mit unimodaler Systemauslegung begannen ($x=85,7\%$; $s=13,4\%$), beantworten die Fragen besser als die Fahrer mit initialer, multimodaler Systemauslegung ($x=66,7\%$; $s=26,5\%$). Die Unterschiede verfehlen die einschlägigen Signifikanzgrenzen ($p=0,14$), deuten aber an, dass auch bei Auslegung einer komplexen Funktion mit unterschiedlichen Teilfunktionalitäten die Aktion des Systems über nur eine Schnittstelle mit dem Fahrer im Hinblick auf die intuitive Erlernbarkeit nicht unbedingt schlechter sein muss, als wenn man die Aktionen auf unterschiedlichen Kanälen transportiert. Die Auswertung der Fragen spricht insgesamt für eine transparente und intuitive Umsetzung der Systemfunktionalität, obwohl es sich beim Querführungsassistenten um ein regelungstechnisch kompliziertes System handelt. Die Versuchspersonen scheinen die Funktionalität sowohl bei unimodaler als auch bei multimodaler Auslegung der Mensch-Maschine-Schnittstelle intuitiv und leicht kennen zu lernen und später bei der Beantwortung der Fragen wiedergeben zu können. Die Ergebnisse stützen damit deutlich die Hypothese 6.3-2.

6.3.7.3 Genereller Systemeindruck

Der subjektive Eindruck des Fahrers vom Gesamtsystem wurde mit Hilfe eines Fragebogens erfasst. Die Versuchsteilnehmer hatten unmittelbar nach Abschluss des Fahrversuchs die Aufgabe, bestimmte Aussagen zum Systemeindruck auf einer 6-stufigen Ordinalskala von „stimmt voll und ganz“ bis „stimmt überhaupt nicht“ zu bewerten. In einem

zweiten Fragenkomplex sollten sie sich mit ihrer Bewertung innerhalb eines, das System beschreibenden, Antagonistenpaares (z.B. „gut“ vs. „schlecht“) platzieren. Dabei wurde bewusst auf eine mittlere Kategorie verzichtet, um den Befragten eine eindeutige Stellungnahme zu ermöglichen.

Bild 55 zeigt die Ergebnisse zum generellen Systemeindruck sowohl für das System mit Systemausprägung U und als auch mit Systemausprägung M. Die Versuchsteilnehmer fühlten sich durch den Querführungsassistenten in hohem Maße bei der Fahrt unterstützt (Median=5,0⁶²). Das System wurde dabei als wenig ablenkend empfunden (Median=2,0⁶²). Die Ergebnisse zeigen zudem, dass die Fahrer sich mit Systemunterstützung zwar etwas sicherer als ohne fühlen (Median=4,0⁶²), deshalb aber nach eigener Einschätzung nicht risikoreicher fahren (Median=2,0⁶²). Neben der hohen Zustimmung zur Systemfunktionalität und der durch die Systemunterstützung kaum veränderten Risikobereitschaft zeigt die Auswertung auch, dass die Benutzer sich nach eigener Einschätzung nicht blind auf das System verlassen (Median=3,0⁶²).

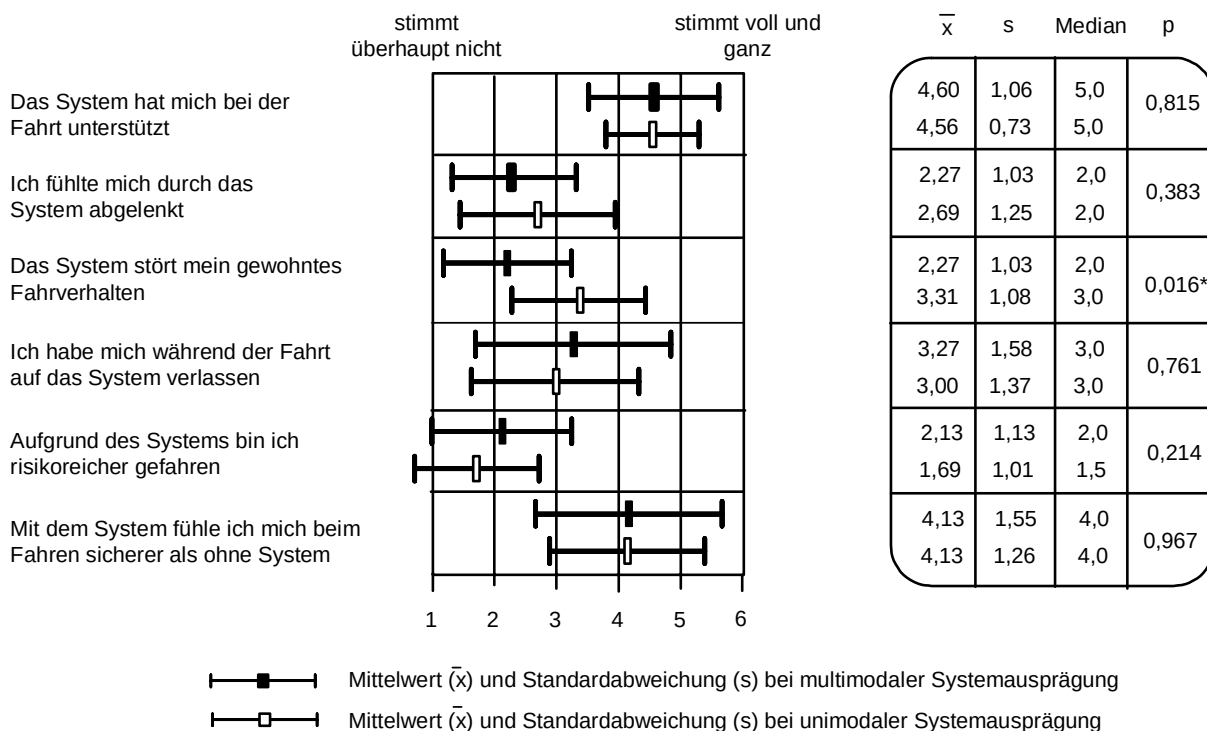


Bild 55: Versuchsergebnisse zum generellen Systemeindruck unterschieden im Falle multimodaler und unimodaler Systemausprägung (Teil 1)

Innerhalb dieses Fragenkomplexes schneidet die Systemausprägung U, die im Fahrversuch sowohl eine Gefährdung beim Spurwechsel als auch beim Spurhalten über ein Lenkmoment darstellt, schlechter ab als die Darbietung der Spurwechselgefährdung über die Außenspiegelanzeige. Die Befragten empfinden die Systemausprägung U als signifi-

⁶² auf einer Skala von 1 bis 6 entspricht 1 = „stimmt überhaupt nicht“, 6 = „stimmt voll und ganz“

kant störender auf das gewohnte Fahrverhalten ($p=0,016$). Die Analyse zeigt zudem, dass die Probanden das System als unterstützend, nützlich, kontrollierbar und sogar als den Fahrkomfort erhöhend (jeweils Median=5,0⁶³), nicht aber als bevormundend empfinden (siehe Bild 56). Das System wird in Systemausprägung U als signifikant unausgereifter beurteilt ($p=0,052$).

Generell empfinde ich das System als...

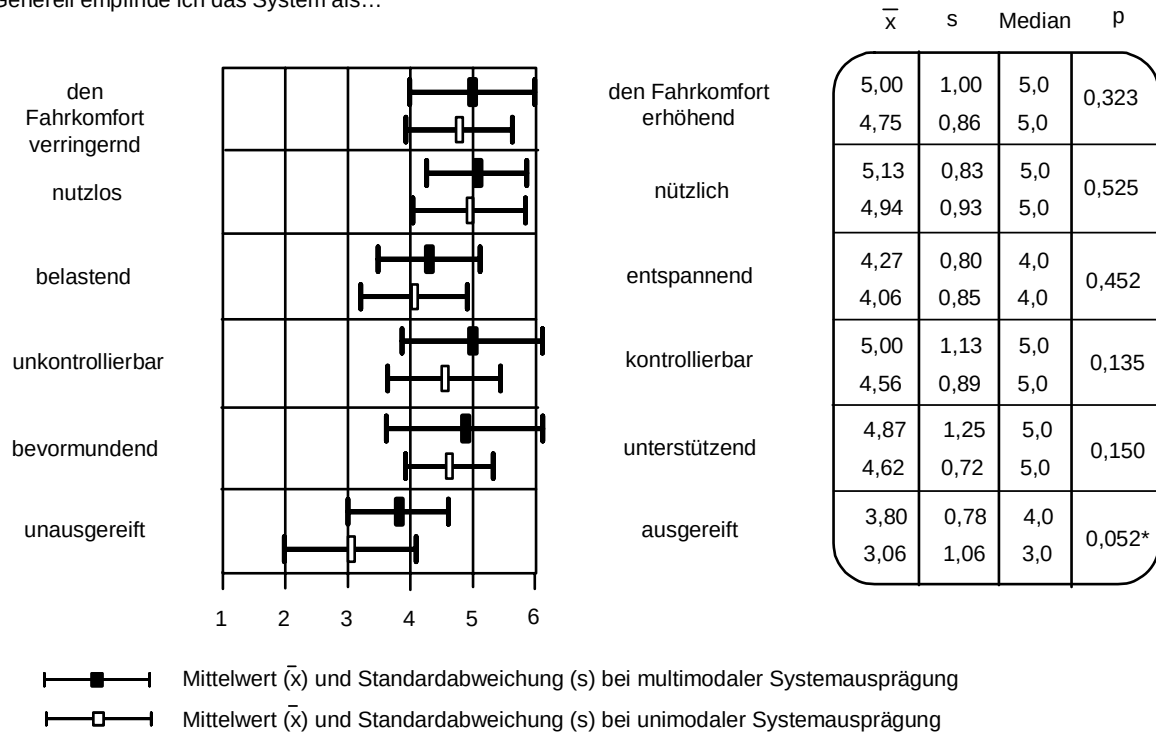


Bild 56: Versuchsergebnisse zum generellen Systemeindruck im Falle multimodaler und unimodaler Systemausprägung (Teil 2)

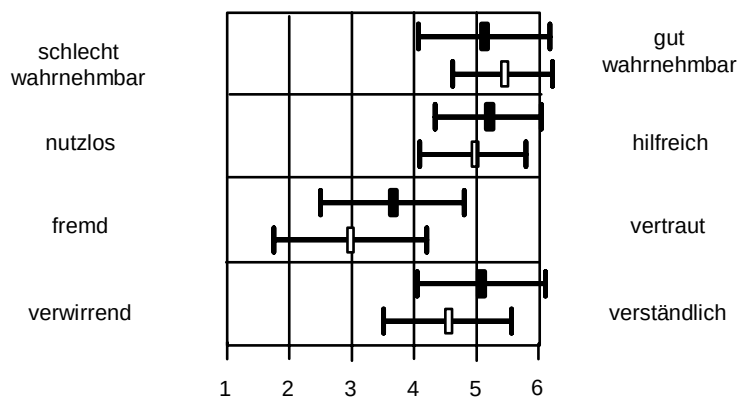
6.3.7.4 Mensch-Maschine-Schnittstelle und Unterschied zwischen unimodaler und multimodaler Systemausprägung

Die Befragung der Versuchsteilnehmer zum Eindruck von der Mensch-Maschine-Schnittstelle ergab bei einem Großteil der Bewertungskriterien keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen der Systemausprägung mit unimodaler und der Ausprägung mit multimodaler Auslegung. Die Warnungen des Gesamtsystems werden, wie die Bild 57 zeigt, in beiden Systemausprägungen als wahrnehmbar, hilfreich und verständlich beurteilt (jeweils Median $\geq 5,0$ ⁶⁴).

⁶³ auf einer Skala von 1 bis 6 entspricht 1 der jeweils schlechtesten Bewertung, und 6 der jeweils besten Bewertung

⁶⁴ auf einer Skala von 1 bis 6 entspricht 1 = negative Bewertung („schlecht wahrnehmbar“, „nutzlos“, „verwirrend“), 6 = positive Bewertung („gut wahrnehmbar“, „hilfreich“, „verständlich“)

Wie bewerten Sie die Warnungen des Systems?



Mittelwert ($\bar{x}$) und Standardabweichung (s) bei multimodaler Systemausprägung
 Mittelwert ($\bar{x}$) und Standardabweichung (s) bei unimodaler Systemausprägung

$\bar{x}$	s	Median	p
5,13	1,06	5,0	0,731
5,31	0,79	5,5	
5,20	0,86	5,0	0,401
4,94	0,85	5,0	
3,67	1,18	4,0	0,155
3,00	1,46	3,0	
5,07	1,03	5,0	0,175
4,56	1,03	5,0	

Bild 57: Versuchsergebnisse zur Mensch-Maschine-Schnittstelle

6.3.8 Auswertung der Fahrleistungsparameter

Um die Auswirkungen des Systems auf das individuelle Fahrverhalten der Versuchsteilnehmer feststellen zu können, werden verschiedene für das Fahrverhalten charakteristische Größen, die jeweils in der Fahrt mit bzw. ohne Systemunterstützung aufgezeichnet wurden, verglichen. Als Größen wurden die über den Versuch gemittelte Ablage des Fahrzeugs aus der Fahrspurmitte (als Maß für die Spurhaltegüte), die Zeitlücken nach hinten zum auffahrenden Fahrzeug beim Fahrspurwechsel (als Maß für die Risikotoleranz) und der Abstand und die Geschwindigkeit zum vorausfahrenden Fahrzeug beim Spurwechsel (als Maß für Spurwechselmotivationsbildung) aufgenommen und anschließend bewertet. Aus dem Abgleich der Daten sollte eine eventuelle Beeinflussung des Fahrverhaltens ersichtlich sein. Die Bewertung einer möglichen Veränderung der Fahrleistung in der Spurhalteaufgabe durch die Systemunterstützung erfolgte anhand der Messwerte zur Ablage des Fahrzeugs in der Fahrspur. Im Spurwechselfall wurde der Abstand und die Differenzgeschwindigkeit betrachtet, die kurz vor dem Spurwechsel zum vorausfahrenden Fahrzeug auf der Fahrspur bestand. Diese Werte erlauben eine Beurteilung darüber, ob sich die Güte der Aufgabenbearbeitung von Spurhaltung und Spurwechsel durch das System durch Verantwortungsübergabe oder erhöhte Risikobereitschaft verändert.

6.3.8.1 Ablagegüte

Um die durchschnittlichen Werte der einzelnen Versuchspersonen für die Ablage beim Fahren mit und ohne Querführungsassistenten untersuchen zu können, wurden nach Abschluss der Versuchsfahrten alle erkennbaren Spurwechsel aus den Datensätzen der Versuchspersonen entfernt, um Verfälschungen des Ergebnisses durch spurwechselinduzierte Ablageänderungen zu vermeiden. Ein Spurwechsel wurde anhand des charakteristi-

schen Verlaufs des Ablagewertes aus der Bildverarbeitung (Ablagesprung) detektiert und die Daten in diesem Fall für die Zeit, in der sich das Fahrzeug in den äußeren Dritteln der Spur befand (Austritt aus Fahrspur, Eintritt in Zielspur) aus den Datensatz gelöscht. Die auf diesem Weg bereinigten Bildverarbeitungsdaten wurden nun für die einzelnen Versuchspersonen und Testfahrten ausgewertet. Dazu wurden Mittelwert und Standardabweichung der Ablage ermittelt. Die Auswertung in Bild 58 zeigt, dass der Mittelwert der Ablage bei Fahrt ohne Systemunterstützung bei einem Wert von 7,7 cm liegt. Die Fahrer fahren im Durchschnitt also leicht in der Spur nach rechts versetzt. Die Standardabweichung hat einen Wert von 48,4 cm. Bei Fahrten mit Systemunterstützung liegt der durchschnittliche Ablagewert bei 6,0 cm, die Standardabweichung bei 60,8 cm. Die Unterschiede zwischen den Fahrten mit und ohne Systemunterstützung sind nicht signifikant. Damit ist die Hypothese 6.3-3 für das Ablageverhalten der Versuchspersonen bestätigt.

Durchschnittliche Ablage...

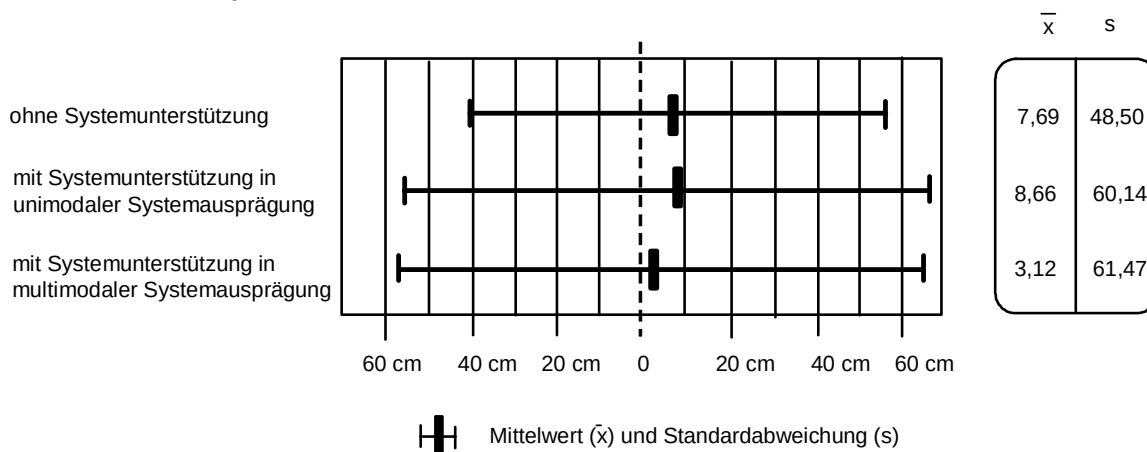


Bild 58: Versuchsergebnisse zur Ablage mit und ohne Systemunterstützung

6.3.8.2 Spurwechseldauer

Bild 59 zeigt den Zusammenhang zwischen Differenzgeschwindigkeit zum Vordermann und Abstand zum Vordermann bei Spurwechselbeginn ohne Querführungsassistent, Bild 60 die charakteristischen Werte bei Unterstützung durch den Querführungsassistenten.

Bei Fahrten mit Systemunterstützung werden zum Zeitpunkt des Spurwechsels geringere Abstände zum Vordermann eingehalten als ohne Systemunterstützung. Bei Fahrten ohne System ergeben sich im Durchschnitt Werte von 58,5 m ($s=22,1$ m) zu einem Vordermann zum Zeitpunkt des Spurwechsels, bei Fahrten mit Systemunterstützung ergibt sich ein mittlerer Wert von 48,4 m ($s=18,5$ m). Dieser Sachverhalt ist statistisch signifikant ($p=0,003$). Auf der anderen Seite sind die Annäherungsgeschwindigkeiten an den Vordermann bei Fahrten mit System geringer. Es ergibt sich ohne System eine durchschnittliche Annäherungsgeschwindigkeit von 7,8 m/s ($x=3,8$ m/s), mit System ein Mittelwert von 6,4 m/s ($s=3,4$ m/s). Dieser Sachverhalt ist statistisch signifikant ($p=0,01$). Zwischen den Systemausprägungen U und M ergeben sich hingegen keine signifikanten Unterschiede.

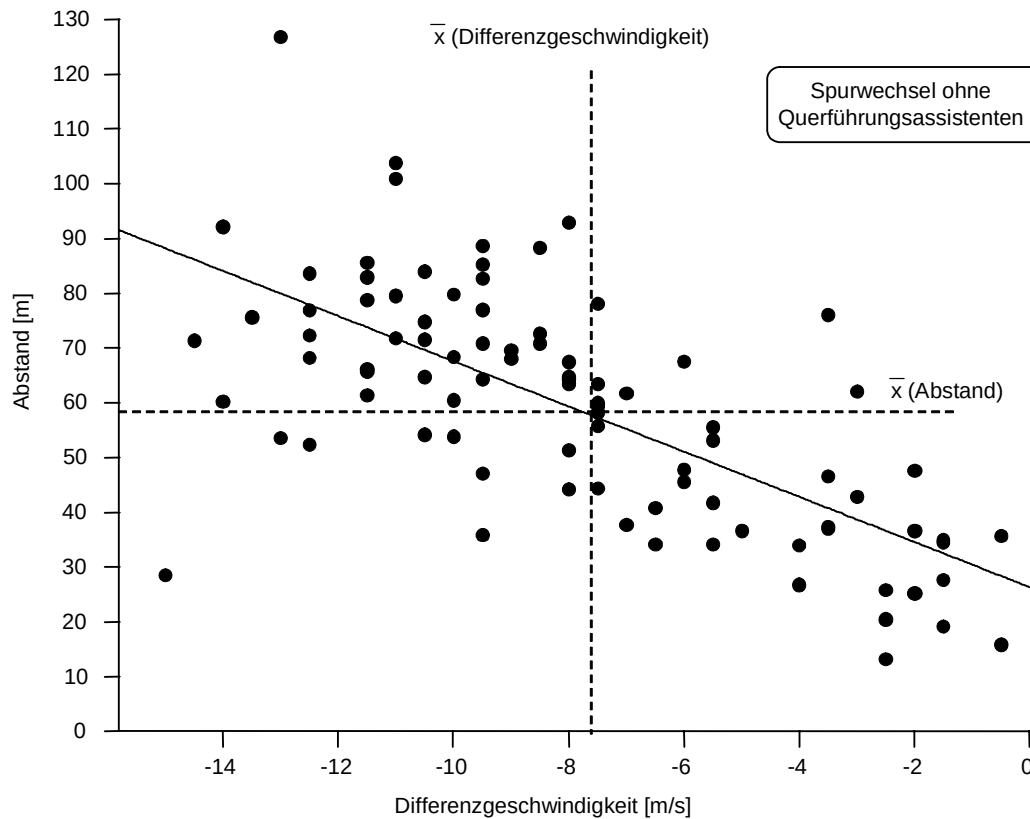


Bild 59: Ergebnisse zum Zusammenhang zwischen Abstand und Differenzgeschwindigkeit bei Spurwechselmanövern ohne Querführungsassistent

Die Abbildungen zeigen zudem, dass es zwischen dem Abstand und der Differenzgeschwindigkeit zum Zeitpunkt des Spurwechsels einen linearen Zusammenhang gibt. Je größer die Differenzgeschwindigkeit, desto mehr Abstand wird beim Spurwechsel eingehalten.

Die Zeit, die vergeht, bis es zu einer Kollision mit dem Vordermann kommt, ergibt sich nach Formel 1 aus dem Abstand dividiert durch die Differenzgeschwindigkeit. Obwohl sich Abstände und Differenzgeschwindigkeiten signifikant zwischen Fahrten mit und ohne System unterscheiden, ergibt der Quotient aus beiden Werten kaum Unterschiede. Achten die Fahrer bei Fahrten mit dem System eher auf eine Differenzgeschwindigkeitsschwelle und weniger auf den Abstand zum Vordermann, so ist es bei Fahrten ohne System genau umgekehrt.

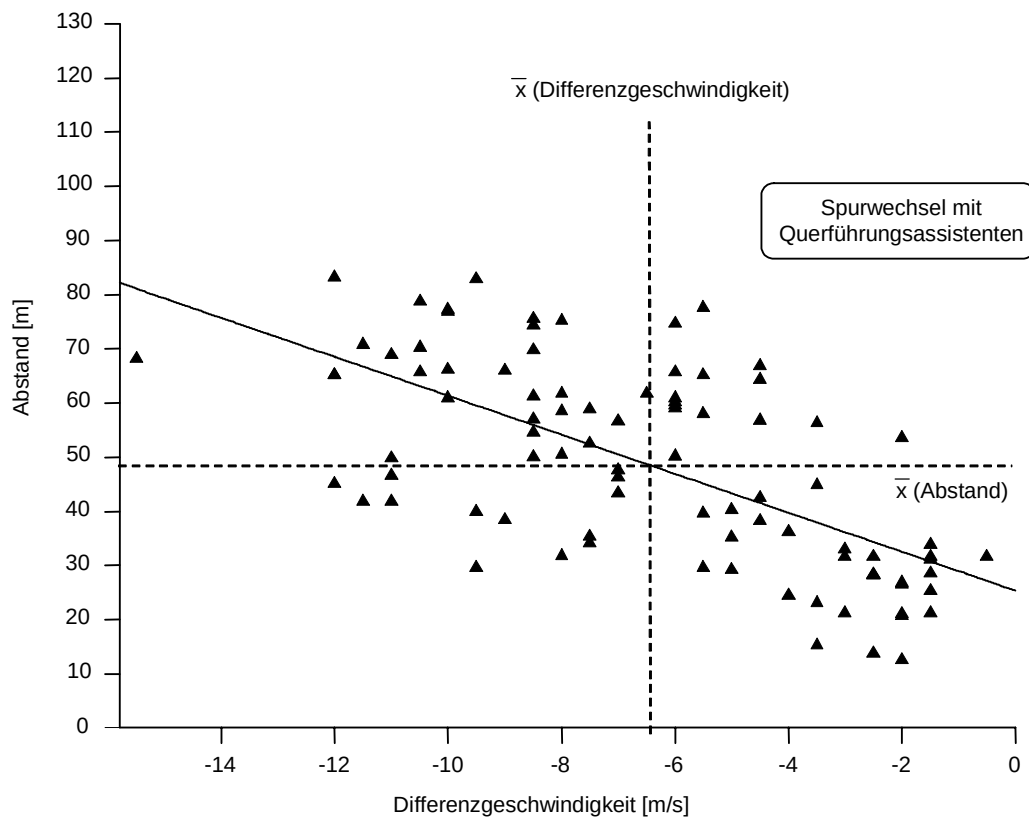


Bild 60: Ergebnisse zum Zusammenhang zwischen Abstand und Differenzgeschwindigkeit bei Spurwechselmanövern mit Querführungsassistent

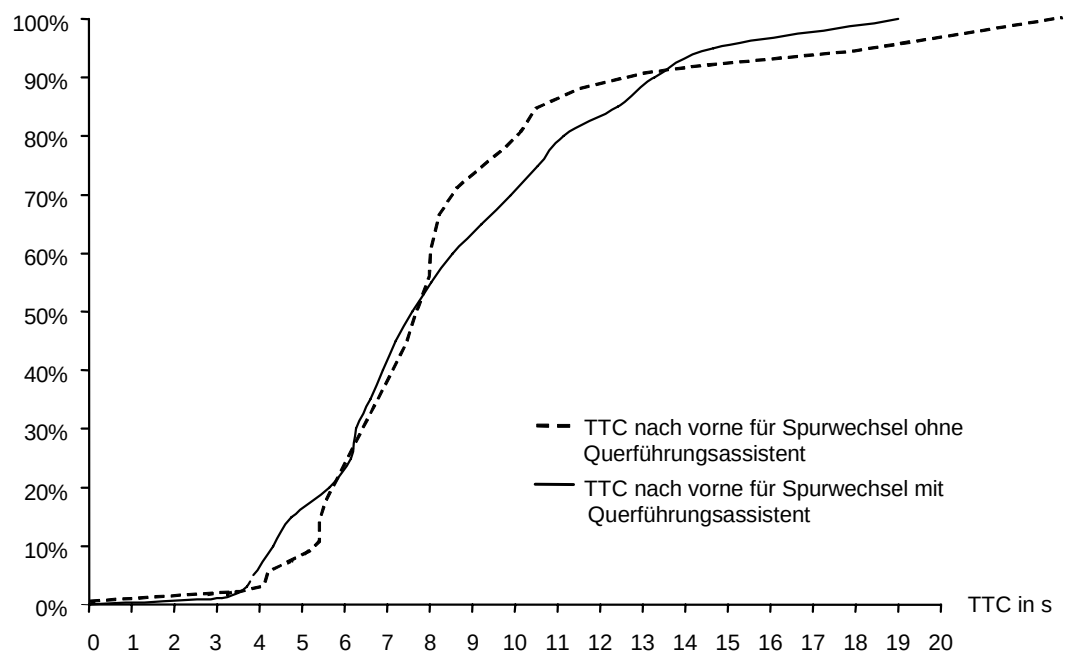


Bild 61: Ergebnisse zur TTC zum Vorderfahrzeug bei Spurwechselmanövern mit und ohne Systemunterstützung in Perzentildarstellung

Bild 61 zeigt, dass sich für die aus Abstand und Differenzgeschwindigkeit berechneten TTC keine Unterschiede zwischen den Fahrten mit und ohne Systemunterstützung ergeben. Der Mittelwert für Fahrten ohne System liegt dann bei 8,4 Sekunden ($s=3,7$ Sekunden) und mit System bei gleichen 8,4 Sekunden ($s=3,3$ Sekunden). Die Abbildung zeigt weiterhin, dass TTC-Werte zum Vordermann unter 3,5 Sekunden und über 10 Sekunden kaum vorkommen. Ausreißerwerte nach oben wurden mit so genannten Boxplots entfernt. Die Ergebnisse stützen damit die Hypothese 6.5-1, da trotz signifikanter Unterschiede in Abstand und Differenzgeschwindigkeit die TTC zum Vordermann auch mit Systemunterstützung unverändert bleibt.

6.3.9 Diskussion

Der Querführungsassistent verändert die Beanspruchung des Fahrers im Vergleich zu Fahrten ohne Systemunterstützung nur unwesentlich (Hypothese 6.3-1). Bei einigen wenigen Fahrten im Rahmen des Fahrversuchs, in denen die Fahrer besonderen Belastungen durch widrige Wetterverhältnisse ausgesetzt waren, konnte mit Systemunterstützung sogar eine Reduzierung des Beanspruchungsniveaus auf unkritische Werte erreicht werden. Trotz mangelnder Erfahrung mit Assistenzsystemen, ohne vorherige Erklärung des Systems und nach etwa halbstündiger Explorationsfahrt beantworteten die Versuchsteilnehmer $\frac{3}{4}$ aller Fragen zur Systemfunktionalität richtig. Das spricht für die intuitive und transparente Auslegung des Querführungsassistenten (Hypothese 6.3-2). Veränderungen des Fahrverhaltens der Versuchsteilnehmer durch das System konnten festgestellt werden. Bei Spurwechselbeginn wird bei Unterstützung des Fahrers durch den Querführungsassistenten signifikant weniger Abstand, aber auch signifikant weniger Differenzgeschwindigkeit zum Vorderfahrzeug zugelassen. Die Betrachtung der zur Kritikalitätsbeurteilung essentiellen TTC zum Vordermann relativiert dieses Ergebnis. Der Quotient aus Abstand und Differenzgeschwindigkeit bleibt trotz Systemunterstützung unverändert (Hypothese 6.3-3). Die verschiedenen Bewertungskriterien zur Akzeptanz des dargebotenen Systems ergeben ein eindeutiges Bild. Das System wird in allen wichtigen Kriterien von den Bedienern positiv bewertet. Das System wird als den Fahrkomfort erhöhend, nützlich, kontrollierbar und unterstützend bezeichnet (Hypothese 6.3-4).

Der Unterschied zwischen unimodaler und multimodaler Systemausprägung trat in der statistischen Auswertung nicht eindeutig in Erscheinung (Hypothese 6.3-5). Das schlechtere Abschneiden des Lenkmoments in einigen, wenigen Fragen stellt aus Sicht des Autors keine Überraschung dar, ist doch neben der neuartigen Systemfunktionalität die Warnung über Lenkmomente eine gänzlich neue Erfahrung für die Bediener. Warnungen über Anzeigen dürfen in der breiten Masse der Autofahrer aufgrund von Erfahrungen mit aktuell am Markt verfügbaren Informations- und Warnsystemen (z.B. ESP-Aktivitätsanzeige, Anzeigen zur optischen Einparkhilfe) als vertraut gelten. Deshalb ist aus der Befragung nicht generell der Schluss zu ziehen, dass nur die Unterstützung des Spurwechselvorgangs durch eine Anzeige im Außenspiegel zielführend sein kann, da sie hier als vertrauter bewertet wird. Da Lenkmomente in den anderen Bewertungskriterien nicht schlechter ab-

schneiden und kein negativer Einfluss auf die Bewertung der Gesamtfunktionalität feststellbar ist, bleibt zu vermuten, dass der Neuigkeitsgrad synthetischer Lenkmomente die festgestellten Effekte verursacht. Die Befragung scheint zusätzlich zu bestätigen, dass die Benutzer statt einer passiven, eine aktive Rolle in der Kooperation mit dem System suchen und sich nicht als reine Überwacher des Systems verstehen. Sie zeigen sich nicht gewillt, die Verantwortung und die Erledigung von Teilen der Fahraufgabe pauschal an das System abzugeben, um sich dann blind auf das System verlassen zu können und um dann die freigewordenen Ressourcen anderweitig verwenden zu können. Sie sehen den Querführungsassistenten vielmehr als nützliches Unterstützungssystem, das erst in einer von ihnen dominierten Interaktion zur gemeinsamen sichereren und zudem komfortableren Erfüllung der Fahraufgabe führt.

6.4 Fahrversuch zum Unterstützungsgrad

Assistenzsysteme können in unterschiedlichen Unterstützungsgraden umgesetzt werden. So bietet auch der Querführungsassistent und die ihm eigene Schnittstelle zwischen Mensch und System die Möglichkeit, die Funktionalität in unterschiedlichen Eingriffs- bzw. Automatisierungsgraden auszulegen. Die Unterstützung beim Spurhalten und beim Spurwechsel kann auf der einen Seite rein informierend erfolgen. Der Fahrer bekommt in diesem Fall beispielsweise über ein akustisches oder ein optisches Signal einen Hinweis auf eine mögliche Gefährdung. Auf der anderen Seite kann das System aber so ausgelegt sein, dass es bereits während des normalen, noch unkritischen Fahrvorgangs über die fahrdynamischen Stellgrößen korrigierend eingreift und den Fahrer damit im Falle des Querführungsassistenten bei der Durchführung des Spurhalte- wie des Spurwechselvorgangs unterstützt.

6.4.1 Modellierung der Spurhalte- und Spurwechselunterstützung

In Abschnitt 2.3.5.2 wurden bereits einige Ansätze zur Modellierung des menschlichen Querführungsverhaltens vorgestellt. Zur Unterstützung des Fahrers beim Spurhaltevorgang ist das Wissen um das menschliche Querführungsverhalten essentiell. Die vorgestellten Modellierungskonzepte sollen nun auf ihre Anwendbarkeit zur Realisierung der Spurhalteunterstützung überprüft werden. Den Ausgangspunkt dieser Überlegungen bildet der Gesamtregelkreis, der die Anordnung zur Lenkmomentendarbietung im Versuchsfahrzeug beschreibt.

In Bild 62 ist zu erkennen, dass der Regelkreis bereits über mehrere unterlagerte Feedback-Schleifen verfügt. Einerseits ist der Aktuatoransteuerung eine Momentenregelung unterlagert, andererseits wird über eine Rückführung der Bildverarbeitung der Wert der Querabweichung zugänglich gemacht. Das Gegenmoment, das abhängig von der Ablage des Fahrzeugs den Fahrer bei der Spurhaltung unterstützen soll, wurde im Rahmen dieser Arbeit mit Hilfe von Stellgliedern auf Basis von FuzzyLogic umgesetzt.

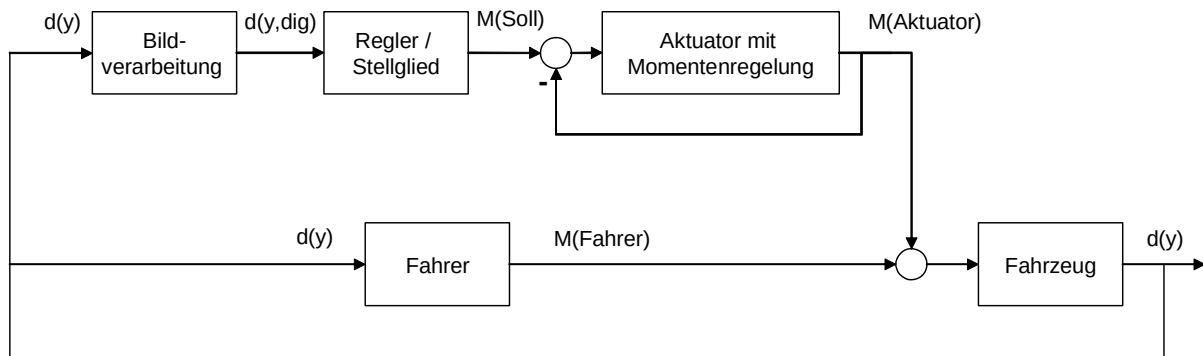


Bild 62: Gesamtregelkreis der Versuchsfahrzeuganordnung

FuzzyLogic bietet den Vorteil, dass die Zuordnung der Eingangsgrößen auf die notwendigen Stellgrößen aufgrund linguistischer Regeln erfolgt. Als Eingangsgrößen werden die Querablage und die Gierwinkelfehler verwendet, wobei sowohl bei diesen Eingangs- wie auch beim Lenkmoment als Ausgangsgröße eine Granulierung durch mehrere Zugehörigkeitsfunktionen („Membership Functions (MSF)“) erfolgt. Mit dieser Lösung ist ein maximaler Freiheitsgrad in der Gestaltung der Lenkmomentenkennlinie der Spurhalteunterstützung denkbar. So kann ein Bereich um die Soll-Spur als Toleranzbereich oder Korridor frei bleiben, in dem die Stellglieder kein Gegenmoment aufbringen. Auch die Gestaltung der Lenkmomentenzunahme hin zu den Fahrspurrändern kann damit beliebig gestaltet werden. Damit sind verschiedene Kombinationsmöglichkeiten möglich. Einige von ihnen werden im Rahmen des nachfolgend vorgestellten Fahrversuchs durch Probanden beurteilt.

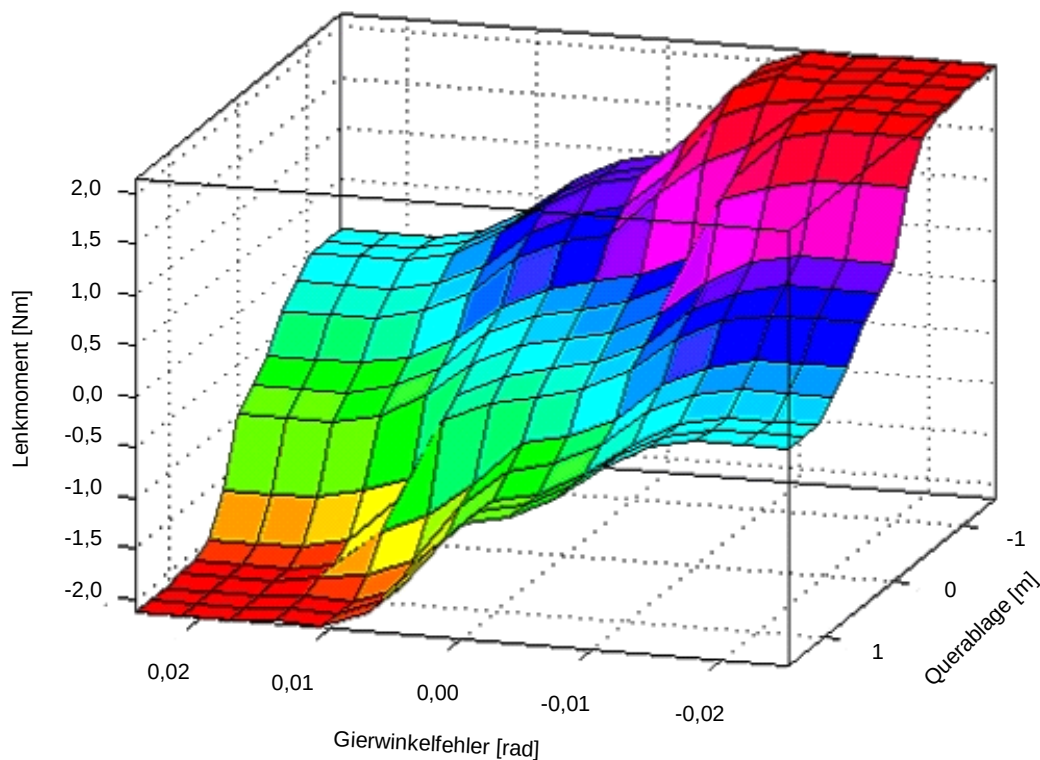


Bild 63: Surface eines der verwendeten Fuzzy-Regler

Bild 63 zeigt die so genannte Oberfläche („Surface“) eines der verwendeten Fuzzy-Regler. Darin ist das jeweilige Sollmoment in Abhängigkeit der Eingangsgrößen Gierwinkelfehler und Querabweichung visualisiert.

Alternativ wurden einige andere Regelkonzepte für ihre Eignung im Rahmen der Spurhalteunterstützung untersucht. Es bieten sich beispielsweise Regelkonzepte auf Basis des robusten Reglers nach ACKERMANN an [1]. Aus den aktuellen fahrphysikalischen Größen Masse, Geschwindigkeit, Trägheitsmoment, den Schwerpunktabständen der Massen sowie den Kraftschlusskoeffizienten des vorderen und hinteren Reifens sind die für die Beschreibung des Fahrverhaltens notwendigen Größen abgeleitet. Als Fahrzeugmodell kommt ein erweitertes Modell der Lenkdynamik zum Einsatz, das der Einfachheit halber linearisiert ist. Diese Vereinfachung ist bei Fahrten ohne große Querbeschleunigungen und ohne enge Kurven, wie dies auf Autobahnen der Fall ist, zulässig. Mit Hilfe dieses Modells lässt sich die gesamte Querbewegung eines Fahrzeugs durch einen Satz von vier Differenzialgleichungen beschreiben. Mit Hilfe der im Modell berechneten fahrdynamischen Größen wird im Fahrzeug das Eingangssignal Lenkwinkel auf die Querablage des Fahrzeugs umgesetzt.

Dieser Ansatz zeigt zwar in Simulationen sehr gute Verläufe, neigt allerdings im realen Fahrbetrieb zu einer starken Instabilität, die auf die nichtidealen Zustände im Versuchsfahrzeug zurückzuführen sind (z.B. geänderte Massenverhältnisse des Fahrzeugs durch die zahlreichen Auf- und Umbauten, Totzeiten in der Bildverarbeitung sowie in der Aktorik). Auch eine Umsetzung des Reglers nach der Fahrerübertragungsfunktion nach MCRUER versagt im Realfahrzeug, da dieser das Fahrzeug innerhalb kürzester Zeit aufschaukelt. Die beiden in konventioneller Regelungstechnik aufgebauten Regler nach MCRUER und ACKERMANN zeigen damit zwar gute Simulationsergebnisse, erweisen sich aber unter den harten Praxisbedingungen als nicht stabilisierbar. In der weiteren Auslegung des Systems finden diese Regelungskonzepte daher keine Verwendung mehr.

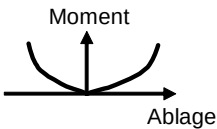
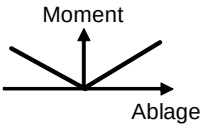
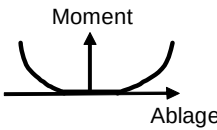
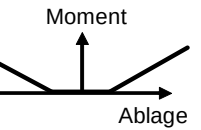
6.4.2 Versuchsziel

Erfahren Systeme mit einem hohen Eingriffs- bzw. Unterstützungsgrad ein hohes Maß an Akzeptanz? Oder sinkt mit steigendem Automatisierungsgrad auch die Akzeptanz des Bedieners? Der nachfolgend beschriebene Versuch soll, gestützt durch die Aussagen eines aussagekräftigen Probandenpools, genau diese Fragen klären. Zum Vergleich stehen vier verschiedene Varianten der aktiven Spurhalteunterstützung sowie zwei Varianten der aktiven Spurwechselunterstützung (vgl. Definition 2.2.7 und 2.2.9). Die aktive *Spurhalteunterstützung* greift über Lenkmomente in den normalen Fahrvorgang ein, um das Fahrzeug in der Mitte der Fahrspur zu halten. Je nach Auslegung kann die Spurhaltung auch autonom erfolgen, das Fahrzeug übernimmt dabei vollständig die Spurhaltung. Die *Spurwechselunterstützung* adaptiert diese Ansätze auf den Spurwechselvorgang. Bei einem eindeutigen Spurwechselwunsch (Blinkerbetätigung) unterstützt das System den Fahrer über Lenk-

momente beim Ausscheren aus der Ist-Spur, beim Übersetzen auf die Nachbarspur und beim Wiedereinfädeln in die Zielspur. Damit wird der Fahrer ähnlich wie bei der Spurhalteunterstützung beim Einhalten einer Spurwechselsolltrajektorie unterstützt.

Zur Generierung der verschiedenen Varianten der aktiven Spurhalteunterstützung, wie sie im Versuch beurteilt werden sollen, werden die Charakteristik des Verlaufs des Lenkmoments über die Ablage als auch ein Toleranzkorridor verwendet. Die damit möglichen vier Kombinationsmöglichkeiten sind in Tabelle 31 dargestellt.

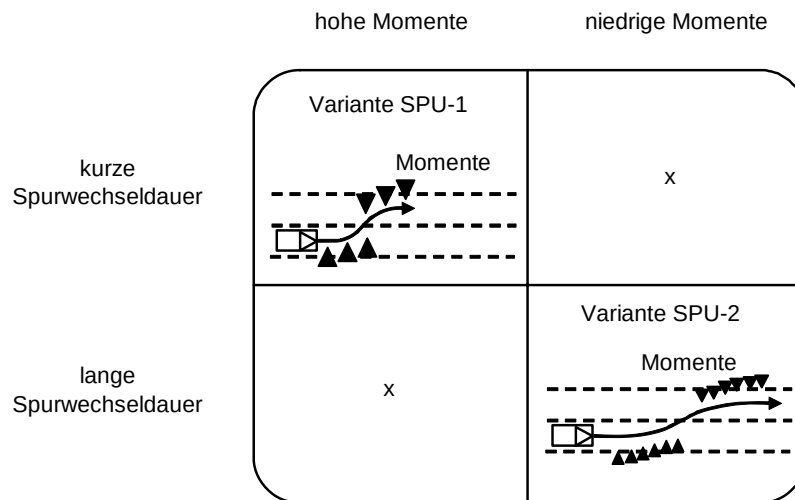
Tabelle 31: Versuchsvarianten zur aktiven Spurhalteunterstützung

	"exponentielle" Auslegung	"lineare" Auslegung
ohne Toleranzkorridor	Variante SHU-1 	Variante SHU-3 
mit Toleranzkorridor	Variante SHU-2 	Variante SHU-4 

Als *exponentielle Auslegung* gilt ein progressiver Lenkmoment-Ablage-Zusammenhang, bei dem das System bei kleinen Ablagewerten mit kleinen und bei großer Ablage und großem Gierwinkel mit starken Momenten das Fahrzeug zurück in die Fahrspurmitte steuert. Anschaulich ist diese Charakteristik mit einer Fahrrinne zu vergleichen. Als *lineare Auslegung* werden im Rahmen dieses Versuchs diejenigen Varianten bezeichnet, bei denen das Moment linear mit zunehmender Ablage zunimmt, ohne aber an den Fahrspurrändern die maximalen Lenkmomentwerte der exponentiellen Auslegung zu erreichen. Als weitere Variation wird der Fahrkorridor eingeführt. Der Fahrkorridor beschreibt einen Bereich um die Fahrspurmitte, in dem die Rückstellmomente zur Fahrspurmitte nicht aktiv sind. In diesem Bereich kann der Fahrer völlig frei agieren, ohne mit Lenkeingriffen des Systems konfrontiert zu werden. Die Breite des Toleranzkorridors wird in diesem Versuch auf 1 m festgelegt. Auf gerader Strecke befindet sich der Toleranzkorridor zentriert um die Fahrspurmitte, in Kurven wird er in Richtung des Kurvenscheitels verschoben, um dem Fahrer das Anschneiden von Kurven zu ermöglichen, ohne dass dieser eine Gegenreaktion des Systems übersteuern müsste.

Die aktive Spurwechselunterstützung wurde den Versuchspersonen in zwei Varianten dargeboten. Die Varianten sind in Tabelle 32 ersichtlich.

Tabelle 32: Versuchsvarianten zur Spurwechselunterstützung



Sie unterscheiden sich in der Stärke der aufgebrauchten Momente und in der Charakteristik der verfolgten Spurwechseltrajektorie. Die Variante SPU-1 unterstützt den Fahrer über deutlich spürbare Lenkmomente bei der Durchführung eines -zeitlich gesehen- recht kurzen Spurwechsels. Die zweite Variante gilt als sicherheits- und komfortorientierte Auslegung und führt mit kleinen Momenten zu einer längeren Spurwechseldauer. Diese Systemvariante ist dabei so ausgelegt, dass sie den Spurwechsel autonom durchführen kann.

6.4.3 Hypothesenbildung

Zahlreiche wissenschaftliche Veröffentlichungen zeigen, dass Systeme mit hohem Automatisierungsgrad zu Vigilanz- und Aufmerksamkeitsproblemen führen können. Zudem stehen Benutzer diesen Systemen ablehnender gegenüber als beispielsweise gegenüber Systemansätzen, die nur informative oder warnende Systemreaktionen an den Fahrer absetzen. Bereits der Versuch zur Schnittstellenmodalität in Kapitel 6.3 macht deutlich, dass Eingriffe über Lenkmomente als störend empfunden werden können. Aus diesem Grund kann man vermuten, dass Systemauslegungen, deren Lenkeingriffe sich auf ein Minimum beschränken, eine höhere Akzeptanz erreichen. Diese Vermutung auf die in dieser Untersuchung dargebotenen Varianten angewendet, führt zu folgenden Hypothesen:

Hypothese 6.4-1: Die Varianten der Spurhalteunterstützung, die keinen Toleranzkorridor vorsehen (SHU-1 und SHU-3), werden im Vergleich zu den Varianten mit Toleranzkorridor (SHU-2 und SHU-4) von den Fahrern als störender empfunden.

Hypothese 6.4-2: Die linearen Varianten der Spurhalteunterstützung (SHU-1 und SHU-2), werden im Vergleich zu den exponentiellen Varianten (SHU-3 und SHU-4) von den Fahrern als störender empfunden.

Hypothese 6.4-3: Die Variante der Spurwechselunterstützung, die den Fahrer mit Hilfe höherer Momente (SPU-1) bei der Durchführung des Spurwechsels unterstützt, hat eine geringere Akzeptanz als die Variante mit kleineren Momenten (SPU-2).

Einige der bereits in Kapitel 2.4.6 zitierten wissenschaftlichen Veröffentlichungen lassen vermuten, dass Versuchspersonen in Vergleichen zur Spurhalteunterstützung diejenige Variante bevorzugen, welche den niedrigsten Automatisierungsgrad hat. Grundsätzlich kann deshalb auch im vorliegenden Fall nicht mit einer hohen Akzeptanz der Systeme zur Spurhalte- wie zur Spurwechselunterstützung gerechnet werden.

Hypothese 6.4-4: Die Auslegung in hohem Automatisierungsgrad verringert die Akzeptanz des Querführungsassistenten.

6.4.4 Versuchsmethodik

Die verschiedenen Versuchziele sind in den Rahmen eines experimentellen Fahrversuchs integriert. Die Untersuchung fand im Realfahrzeug auf öffentlichen Straßen statt, da das Erleben zahlreicher charakteristischer Größen zur Spurhalte- wie Spurwechselunterstützung (Zeitlücken zu nachfolgendem Verkehr auf Zielspur, Querbefleunigung, Lenkmoment) im Fahrsimulator nur unzureichend nachgebildet werden kann.

Die relevanten Fragestellungen sollen mit Hilfe eines Fragebogens beantwortet werden. Die Fragen konzentrierten sich dabei auf drei Komplexe. Die Systemfunktionalität zu bewerten setzt eine ausgereifte Systemdarbietung voraus. Aus diesem Grund wurden die Probanden dazu befragt, inwieweit sie die Reaktionen des Systems als rechtzeitig und rechtmäßig beurteilen. Im Falle der Spurhalteunterstützung wurden dazu die Probanden zu ihrem Eindruck zur Höhe und zum Zeitpunkt der aufgegebenen Lenkmomente sowie zur vorgeschlagenen Fahrtrajektorie in der Spurmitte befragt. Das besondere Augenmerk lag auf dem Einfluss der Systeme auf Störungsempfindung der Versuchspersonen. Im Rahmen des Fahrversuchs sollten die verschiedenen Regler unter diesem Aspekt verglichen werden. Auch der generelle Eindruck des Systems sollte anhand eines Fragebogens ermittelt werden.

6.4.5 Versuchspersonen

Am Fahrversuch nahmen insgesamt 14 Personen teil (siehe Tabelle 33). Die Versuchspersonen waren ausnahmslos Mitarbeiter der Technischen Entwicklung der AUDI AG und der Audi Electronics Venture GmbH. Aufgrund ihrer Beschäftigung kann bei den Versuchspersonen sowohl auf eine längere Erfahrung im Umgang mit Oberklassefahrzeugen als auch auf ein erhöhtes technisches Fachwissen geschlossen werden. Es wurde bei allen Versuchspersonen darauf geachtet, dass diese über keinerlei Vorkenntnisse über das dargebotene System verfügten.

Tabelle 33: Eigenschaften der Versuchsprobandengruppe

Charakteristik	Wertebereich	
Anzahl Versuchspersonen	14 Personen	
Geschlecht	weiblich 3 Personen	männlich 11 Personen
Alter	durchschnittlich 26,9 Jahre (s = 3,6 Jahre)	
Jährliche Fahrleistung	durchschnittlich 26.214 km (s = 16.475 km)	
Fahrerfahrung	durchschnittlich 9 Jahre (s = 3,6 Jahre)	

6.4.6 Versuchsaufbau

Als Versuchsfahrzeug diente das in Kapitel 1 vorgestellte Versuchsfahrzeug. Die Lenkmomente zur Unterstützung des Fahrers beim Spurhalte- und Spurwechselvorgang wurden über den implementierten Lenkaktuator aufgebracht. Die Größe der Lenkmomente ist aus Sicherheitsgründen auf einen Maximalwert von 2 Nm begrenzt. Damit wird sichergestellt, dass der Fahrer jederzeit einerseits die vom System aufgegebenen Lenkmomente übersteuern kann und dass andererseits nicht auszuschließende, spontane Lenkmomentaufgaben zu keinen kritischen fahrdynamischen Zuständen führen.

6.4.7 Versuchsdurchführung

Der Versuch fand auf einer meist dreispurigen Autobahn statt. Am Versuch waren jeweils ein Versuchsteilnehmer, ein Versuchsleiter sowie ein technischer Beobachter beteiligt. Die Probanden wurden darauf aufmerksam gemacht, die Richtgeschwindigkeit von 130 km/h einzuhalten und den Tempomaten nicht zu benutzen. Auf der Autobahn wurden dem Fahrer die verschiedenen Systemvarianten nacheinander aufgeschaltet. Die Reihenfolge der dargebotenen Systemvarianten permutierte zwischen den einzelnen Versuchspersonen nach einem vorher festgelegten Versuchsplan. Nach einigen Minuten, nach denen der Versuchsteilnehmer die jeweilige Systemausprägung erprobt hatte, stellte ihm der Versuchsleiter verschiedene Fragen und notierte die Antworten. Die gesamte Versuchsfahrt nahm für jeden Versuchsteilnehmer etwa 2 Stunden in Anspruch. Die Probanden konnten sich damit jeweils über eine Fahrtstrecke von etwa 220 km mit den verschiedenen Systemausprägungen vertraut machen und auf dieser Basis eine fundierte Meinungsbildung erreichen.

6.4.8 Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse für die aktive Spurhalteunterstützung und die aktive Spurwechselunterstützung werden im Folgenden getrennt dargestellt. Abschließend werden die Ergebnisse

zur generellen Einschätzung des Querführungsassistenten in einer Ausprägung mit hohem Automatisierungsgrad besprochen.

6.4.8.1 Ergebnisse zur Spurhalteunterstützung

Um die Ergebnisse als valide bezeichnen zu können, muss sichergestellt sein, dass die Systemfunktionalität auf einem technischen Stand umgesetzt wurde, der eine Bewertung des gewünschten Unterstützungsgrades erlaubt. Andernfalls könnten fehlerhafte Aktionen des Systems, die auf eine mangelhafte Güte der Systemumsetzung zurückzuführen sind, einen unkontrollierten Einfluss auf die Beantwortung der Fragen zur Akzeptanz führen.

Die statistische Auswertung des Fragebogens zeigt nun, dass die Fragen, die eine Einschätzung des technischen Reifegrades erlauben, durchweg zufrieden stellende Ergebnisse liefern. So bedenken die Befragten den Zeitpunkt der Unterstützung in Bezug auf den Abstand des Fahrzeugs von der Spurmarkierung als genau richtig ($\bar{x}=3,3^{65}$; $s=0,9$). Zusätzlich liegt die Höhe der dabei aufgebrachten Momente im Durchschnitt aller vier Varianten nach Ansicht der Befragten nahe des optimalen Bereichs ($\bar{x}=3,8^{66}$; $s=0,7$). Auch die durch das System vorgeschlagene Position in der Spur auf geraden Streckenabschnitten ($\bar{x}=3,4^{67}$; $s=0,7$) sowie in Kurvendurchfahrten ($\bar{x}=3,4^{68}$; $s=0,6$) ist so umgesetzt, dass eine Akzeptanzbewertung des Systems durch die Bediener erfolgen kann (siehe Bild 64).

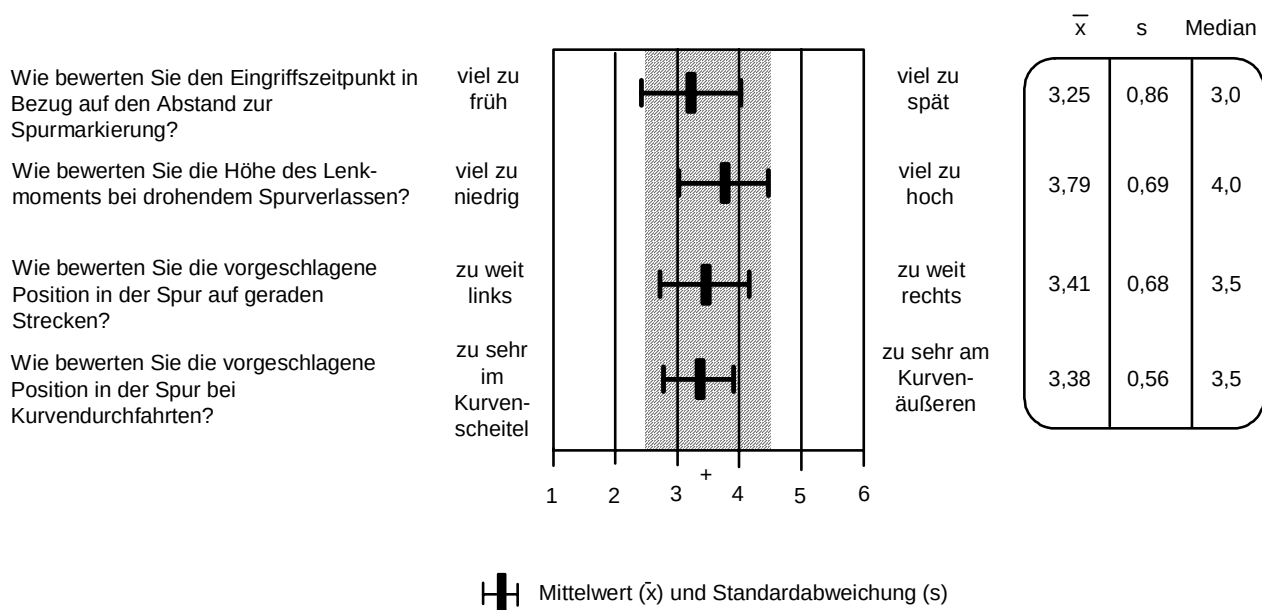


Bild 64: Ergebnisse zur Rechtmäßigkeit und Rechtzeitigkeit der Aktionen der Spurhalteunterstützung

⁶⁵ auf einer Skala von 1 bis 6 entspricht 1 = „viel zu früh“, 6 = „viel zu spät“

⁶⁶ auf einer Skala von 1 bis 6 entspricht 1 = „viel zu niedrig“, 6 = „viel zu hoch“

⁶⁷ auf einer Skala von 1 bis 6 entspricht 1 = „zu weit links“, 6 = „zu weit rechts“

⁶⁸ auf einer Skala von 1 bis 6 entspricht 1 = „zu sehr im Kurvenscheitel“, 6 = „zu sehr am Kurvenäußeren“

Deutliche Unterschiede zwischen den Varianten der Spurhalteunterstützung zeigen sich bei der subjektiven Beurteilung von Regelaktivität, Reifegrad, Unterstützungsgrad, Fahrkomfortsteigerung und Belastung. Die Antwort auf die Frage, ob die im Lenkrad spürbare Regleraktivität als störend empfunden wird, zeigt sich in Bild 65. Es wird deutlich, dass die Varianten mit Toleranzkorridor (SHU-2 und SHU-4) deutlich besser abscheiden als die Varianten ohne Toleranzkorridor (SHU-1 und SHU-3). Die Aktivität des Systems am Lenkrad wird als signifikant weniger störend empfunden, wenn ein Toleranzkorridor existiert. Das Signifikanzniveau zwischen der Variante mit und ohne Toleranzkorridor nimmt im Falle der exponentiellen Auslegung (SHU-1 vs. SHU-2) einen Wert von $p=0,007$ an. Der Unterschied ist damit hoch signifikant. Im Falle der linearen Auslegung ist das deutlich bessere Abschneiden der Variante mit Korridor auf einem Signifikanzniveau von $p=0,045$ belegbar. Die Hypothese 6.4-1 kann damit statistisch bewiesen werden.

Das Vorhandensein eines Toleranzkorridors bleibt auch bei der Betrachtung weiterer Bewertungskriterien statistisch nachweisbar. So werden die Varianten mit Toleranzkorridor als ausgereifter ($p<0,001$), als unterstützender ($p=0,002$), als komfortbetonter ($p=0,002$) und als entspannender ($p=0,001$) im Vergleich zu ihren Pendanten ohne Korridor beurteilt. Bei der direkten Frage nach der Systempräferenz entscheiden sich 10 von 14 Personen für die Varianten SHU-2 oder SHU-4.

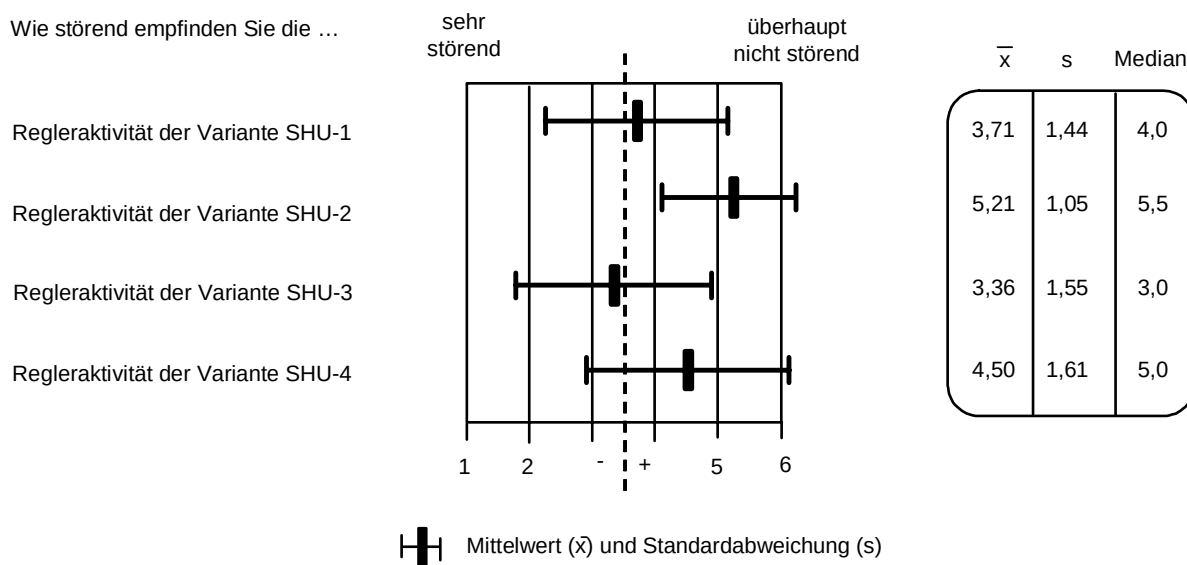


Bild 65: Ergebnisse zur Störung durch die Regleraktivität der vier Varianten der Spurhalteunterstützung

Systeme hohen Automatisierungsgrades können unter Umständen den Fahrer dazu verführen, die Verantwortung für einzelne Teile oder die gesamte Fahraufgabe an das System abzutreten. Die Auslegung der Varianten ohne Korridor, wie sie in diesem Versuch präsentiert wurden, macht eine autonome Spurführung möglich. Die Befragung zeigt, dass nach Meinung der Versuchsteilnehmer die Kontrolle des Fahrzeugs bei aktiviertem Sys-

tem immer dem Fahrer obliegt. Der Mittelwert für die Systemvarianten mit Korridor beträgt $x_{SHU-1\&SHU-3}=1,5^{69}$, für die Varianten ohne Toleranzkorridor $x_{SHU-2\&SHU-4}=2,25$. Wie vorherzusehen war, wird dieser Sachverhalt damit bei den Systemauslegungen mit Korridor von den Probanden deutlicher bestätigt (Signifikanzniveau $p=0,01$). Diese laden auch nicht dazu ein, die Hände vom Lenkrad zu nehmen und dem System sich und die Spurhaltung anzuvertrauen, da die Reglercharakteristik dazu führen würde, dass das Fahrzeug um die Fahrspurmitte zu pendeln beginnt. Generell empfiehlt sich hier die Einführung einer so genannten „Hands-Off-Erkennung“, um Fehlbedienungen des Systems durch den Fahrer zu vermeiden. Diese deaktiviert die Systemaktivität sofort, wenn der Fahrer die Hände vom Lenkrad nimmt.

Bei Betrachtung der jeweiligen Mittelwerte wird deutlich, dass die Systeme exponentieller Auslegung (SHU-1 & SHU-2) im Vergleich zu den Systemvarianten mit linearer Auslegung (SHU-3 & SHU-4) durchweg positiver bewertet werden. Sie werden als unterstützender ($x_{SHU-1\&SHU-2}=3,7^{70}$ zu $x_{SHU-3\&SHU-4}=3,5$), Fahrkomfort erhöhender ($x_{SHU-1\&SHU-2}=4,1^{71}$ zu $x_{SHU-3\&SHU-4}=3,7$) und entspannender ($x_{SHU-1\&SHU-2}=3,8^{72}$ zu $x_{SHU-3\&SHU-4}=3,6$) beurteilt. Diese Unterschiede zwischen exponentieller Auslegung und linearer Auslegung verfehlen aber eindeutige Signifikanzgrenzen knapp. Die Hypothese 6.4-2 kann damit zwar unterstützt, nicht aber statistisch eindeutig belegt werden.

6.4.8.2 Ergebnisse zur Spurwechselunterstützung

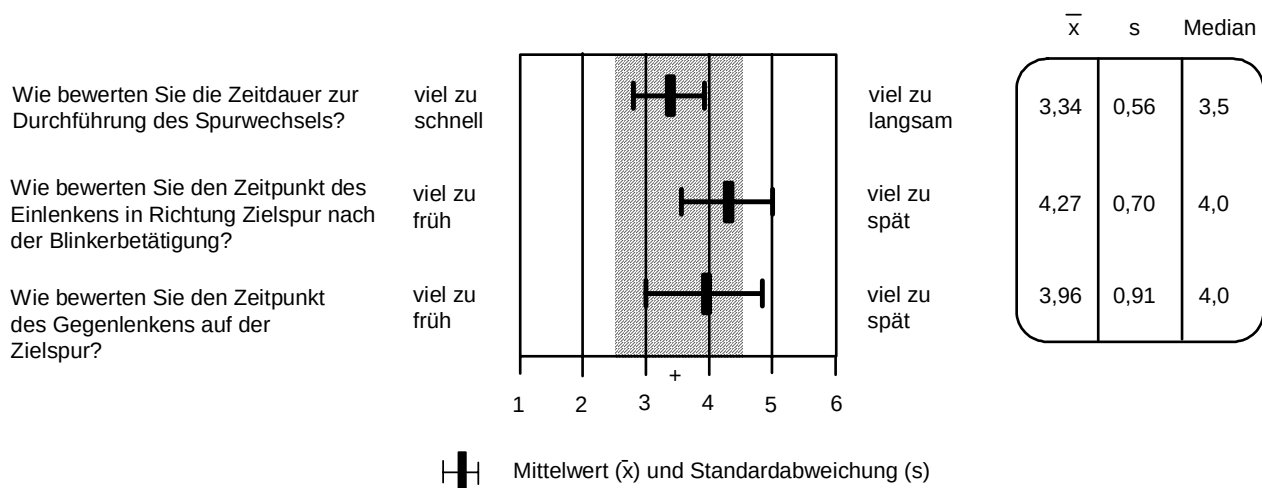


Bild 66: Ergebnisse zur Rechtmäßigkeit und Rechtzeitigkeit der Aktionen der Spurwechselunterstützung

⁶⁹ auf einer Skala von 1 bis 6 entspricht 1 = „Verantwortung für Kontrolle des Fahrzeugs bei eingeschaltetem System liegt beim Fahrer“, 6 = „Verantwortung für Kontrolle des Fahrzeugs liegt beim System“

⁷⁰ auf einer Skala von 1 bis 6 entspricht 1 = „bevormundend“, 6 = „unterstützend“

⁷¹ auf einer Skala von 1 bis 6 entspricht 1 = „Fahrkomfort vermindern“, 6 = „Fahrkomfort erhöhend“

⁷² auf einer Skala von 1 bis 6 entspricht 1 = „belastend“, 6 = „entspannend“

Die Versuchsteilnehmer beurteilen die vom System vorgeschlagene Spurwechselmanöver beider Varianten als weder zu schnell noch als zu langsam (Median=3,5⁷³). Einzig die Lenkmomente, die beim Ausscheren und beim Einfädeln in die Zielspur aufgegeben werden, können nach Betätigung des Blinkers etwas schneller erfolgen (Medianwerte=4,0⁷⁴). Die Ergebnisse verdeutlicht Bild 66.

Es zeigt sich, dass die Unterschiede zwischen beiden Varianten SPU-1 und SPU-2 im realen Fahrbetrieb von den Probanden kaum zu unterscheiden sind. Dass die Variante SPU-2 aufgrund ihrer Charakteristik und Reglerauslegung später einlenkt, den Fahrer später auf die Zielspur führt und damit der Spurwechsel länger als bei Variante SPU-1 dauert, tritt in den Befragungsergebnissen statistisch nicht signifikant zu Tage. Unterschiede ergeben sich in der Wahrnehmung der Lenkmomente. So werden diejenigen der Variante SPU-1 als sehr stark ($x=2,3$ ⁷⁵; $s=0,8$) eingestuft, während die der Variante SPU-2 ($x=3,1$; $s=0,7$) als nur noch leicht zu stark angesehen werden. Die Unterschiede sind statistisch signifikant auf einem Niveau von $p=0,027$. Die Frage nach der Kontrollierbarkeit des Systems hängt sehr stark mit diesem Effekt zusammen. So ergibt die Befragung, dass die Variante SPU-2 als gut kontrollierbar ($x=2,6$ ⁷⁶; $s=1,1$), die Variante SPU-1 hingegen als signifikant schlechter kontrollierbar ($x=3,4$; $s=1,1$; $p=0,048$) angesehen wird. Die höheren Momente der Variante SPU-1 werden von den Versuchsteilnehmern nicht akzeptiert und führen zu einem negativen Einfluss auf den Eindruck der Kontrollierbarkeit des Systems. Die Hypothese 6.4-3 kann damit zwar gestützt, nicht aber statistisch eindeutig bewiesen werden.

6.4.8.3 Ergebnisse zum Gesamtsystem

Ein Querführungsassistent, der mit der Unterstützung beim Spurhalten und beim Spurwechsel über Lenkmomente eine hohe Form des Automatisierungs- bzw. Unterstützungsgrades aufweist, kann nach Auswertung dieser Befragung nicht bestehen. So würden die Probanden der Kombination aus Spurwechsel- und Spurhalteunterstützung nur die Durchschnittsnote „befriedigend“ ($x=3,3$ ⁷⁷; $s=0,9$) geben. Die Frage, ob beim Kauf eines Fahrzeugs der Querführungsassistent als Sonderausstattung in Erwägung gezogen würde, zeigt ein unentschlossenes Bild ($x=3,6$ ⁷⁸; $s=1,15$). Bild 67 zeigt den Eindruck der Befragten zu verschiedenen Bewertungskriterien.

Die Hypothese 6.4-4 kann damit als bewiesen gelten. Im Vergleich der vorliegenden Bewertungswerte zu den Ergebnissen des Fahrversuchs zur Schnittstellenmodalität zeigt sich ein erheblicher Unterschied. Das System, das im Rahmen des Versuchs in Kap. 6.3 von den Versuchsteilnehmern erfahren werden konnte und das einen erheblich niedrige-

⁷³ auf einer Skala von 1 bis 6 entspricht 1 = „viel zu schnell“, 6 = „viel zu langsam“

⁷⁴ auf einer Skala von 1 bis 6 entspricht 1 = „viel zu früh“, 6 = „viel zu spät“

⁷⁵ auf einer Skala von 1 bis 6 entspricht 1 = „zu stark“, 6 = „zu schwach“

⁷⁶ auf einer Skala von 1 bis 6 entspricht 1 = „kontrollierbar“, 6 = „unkontrollierbar“

⁷⁷ auf einer Skala von 1 bis 6 entspricht, 6 = „ungenügend“, 5 = „mangelhaft“, 4 = „ausreichend“, 3 = „befriedigend“, 2 = „gut“, 1 = „sehr gut“

⁷⁸ auf einer Skala von 1 bis 6 entspricht 1 = „stimmt überhaupt nicht“, 6 = „stimmt voll und ganz“

ren Automatisierungsgrad ausweist, wird als deutlich nützlicher ($\text{Median}_{\text{Kap6.3}}=5,0^{79}$ vs. $\text{Median}_{\text{Kap6.4}}=4,0$) bewertet.

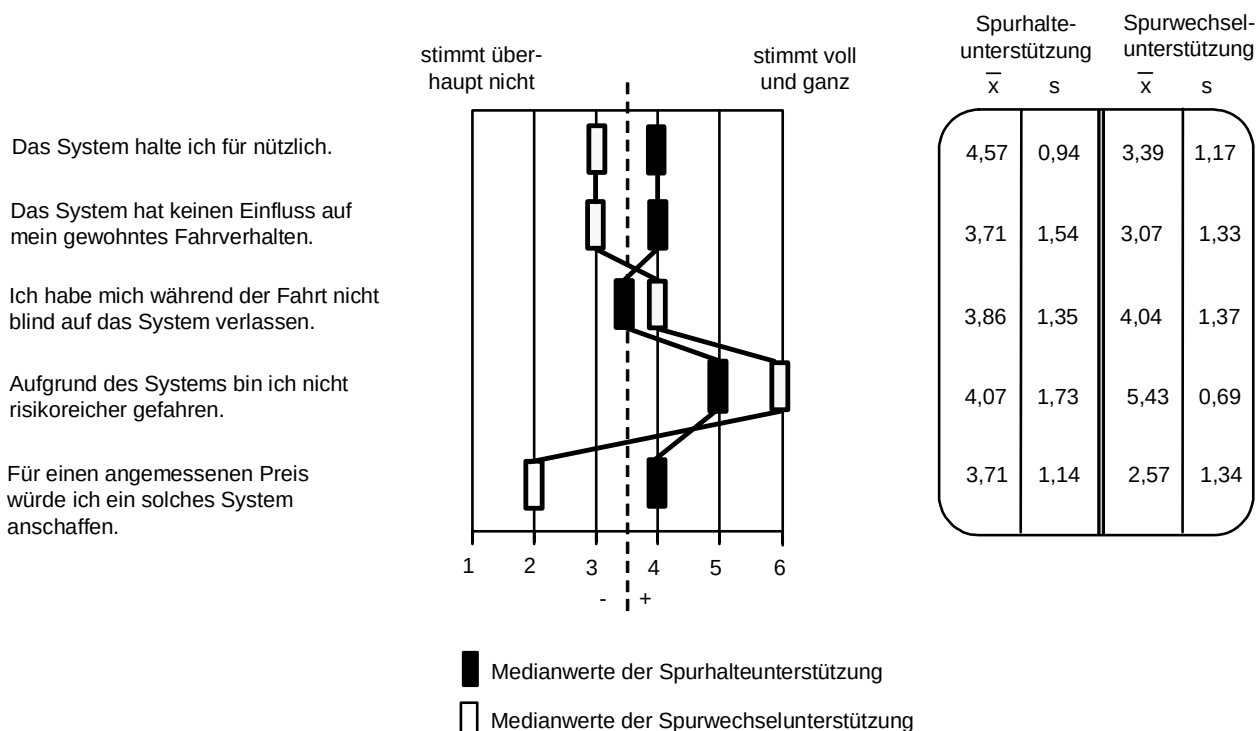


Bild 67: Ergebnisse zur allgemeine Akzeptanz der Spurhalte- und der Spurwechselunterstützung

6.4.9 Diskussion

Die Untersuchung zeigt, dass hoch automatisierte Systeme zur Unterstützung des Fahrers im Fahrvorgang auf wenig Akzeptanz stoßen. Fahraufgaben, die wie das Spurhalten oder der Spurwechsel im Normalfall gefahrlos vom menschlichen Bediener erledigt werden, bedürfen nach Meinung vieler keines andauernden, korrigierenden Eingriffs. Diese Aussage wird dadurch statistisch untermauert, dass beim Vergleich der Spurhalteunterstützung diejenigen Varianten signifikant besser abschneiden, die dem Fahrer über einen Toleranzkorridor einen großen Freiheitsgrad lassen. Bei ihnen wird der Fahrer in einem Bereich um die Mitte der Fahrspur mit keinerlei Systemreaktion beaufschlagt. Die Hypothese 6.4-1 kann damit belegt werden. Auch unter Sicherheitsaspekten ist das sinnvoll, da er sich dort im absolut unkritischen Bereich befindet. Eine mögliche Komfortsteigerung durch dauernde, korrigierende Eingriffe in den Varianten ohne Toleranzkorridor konnten nicht bestätigt werden. Erst bei einem drohenden Abkommen aus der Fahrspur akzeptieren die Fahrer die unterstützenden Reaktionen des Systems. Die Hypothese 6.4-2 kann durch die Auswertung gestützt werden. Der Eingriff bei der Spurhalteunterstützung sollte eher warnend über ein Moment erfolgen, das anschaulich mit einer Fahrrinne oder einem Eiskanal zu

⁷⁹ auf einer Skala von 1 bis 6 entspricht 1 = „nutzlos“, 6 = „nützlich“

vergleichen ist. Ein linearer Ablage-Gegenmoment-Zusammenhang (lineare Auslegung) wird schlechter bewertet. Damit zeigt sich, dass eine Spurhalteunterstützung mit breitem Toleranzkorridor und exponentieller Auslegung durchaus auf Akzeptanz stoßen kann. Die Befragung macht zudem deutlich, dass eine Spurhalteunterstützung nach Meinung der Benutzer einen positiven Einfluss auf die Verkehrssicherheit hat.

Die Spurwechselunterstützung findet im Rahmen dieses Versuchs generell wenig Anklang. Die Versuchsteilnehmer, die gebeten wurden, dem System eine Gesamtnote zu geben, bedachten die beiden Varianten mit einer nur befriedigenden Durchschnittsnote ($x_{\text{SWU-1}}=3,6^{77}$; $s=1,0$; $x_{\text{SWU-2}}=3,5$; $s=1,2$). Die getestete Spurwechselunterstützung wird zudem als eher fremd, eher belastend und eher bevormundend angesehen, wobei die Variante SPU-2 hier besser als Variante SPU-1 beurteilt wird. Die Hypothese 6.4-3 ist damit vermutlich richtig formuliert. Die Systemauslegung scheint gelungen. So wird die Frage nach der hilfreichen Führung des Systems mit einem Medianwert von $2,0^{80}$ als gut bewertet. Den Kauf einer Spurwechselunterstützung können sich aber offensichtlich nur wenige vorstellen.

Zusammenfassend bleibt zu sagen, dass ein im Vergleich zur Spurverlassenswarnung gesteigerter Unterstützungsgrad bei der Spurhaltung auf Akzeptanz stoßen kann, wenn dem Fahrer genügend Freiheiten bleiben, die Fahraufgabe selbstständig zu lösen, und nur im Fehler- oder Gefahrenfall eine Reaktion des System erfolgt. Ein System, dass auch bei einer als unkritisch erlebten Fahrsituation an der Lenkung tätig ist, wird aller Voraussicht nach nicht erfolgreich sein können. Die Untersuchung zeigt damit sehr deutlich, dass Versuche, mit hochautonomen Lösungen in die Querführung einzugreifen, nicht als akzeptanzsteigernde Maßnahme empfohlen werden können.

Der Fahrversuch zur Bewertung des Gesamtsystems in Kap. 7 wird damit den Querführungsassistenten nur als Kombination aus Spurverlassenswarner und Spurwechselassistent dar bieten, nicht aber höherautonome Lösungen zur Spurhalteunterstützung und Spurwechselunterstützung beinhalten, da diese, wie beschrieben, eine geringere Zustimmung bei den Fahrern finden.

6.5 Fahrversuch zur Spurwechselerkennung

In den bisher vorgestellten Systemansätzen zur Unterstützung des Fahrers in der Querführung würde der Fahrer bei einem Spurwechsel nur dann vor Fahrzeugen auf der Nachbarspur gewarnt, wenn er seinen Spurwechselwunsch mit der Betätigung des Blinkers deutlich machte. Andernfalls geht der Querführungsassistent von einem ungewollten Spurverlassen aus und agiert in der dafür vorgesehenen Weise. Die Blinkerbetätigung stellt demnach die Grenzbedingung, um zwischen Situationen mit absichtlich initiierten

⁸⁰ auf einer Skala von 1 bis 6 entspricht 1 = „sehr gut geführt“, 6 = „nicht geführt“

Spurwechseln und denen mit unbeabsichtigtem Spurverlassen zu unterscheiden. Die Ergebnisse der Multimediabefragung zeigen jedoch, dass der Nutzen des Querführungsassistenten für fast 2/3 der Befragten beschränkt wäre, wenn das System den absichtlichen Spurwechsel nur bei Blinkerbetätigung erkennt. Dazu ist ein Modell notwendig, dass die Spurwechselmotivation des Fahrers nachbildet. Aufgrund der Schwierigkeiten bei der Nachbildung intrinsischer Zustände des menschlichen Bedieners kann dafür nur auf fahrzeuginterne (z.B. Eigengeschwindigkeit) und fahrzeugexterne Größen (z.B. Abstand zum Vordermann) zurückgegriffen werden.

Die Multimediabefragung zeigt weiterhin, dass etwa die Hälfte der Befragten eine Informationsstufe als Ergänzung der Warnung bevorzugt. Diese informiert den Fahrer beispielsweise über eine unterschwellige, optische Anzeige, wenn die Nachbarspur belegt ist, bisher aber noch kein Spurwechselwunsch durch die Betätigung des Blinkers bestätigt ist. In Situationen mit regem Verkehr auf den Nachbarspuren (z.B. zähflüssiger Kolonnenverkehr) kann dieser Ansatz zu einer sehr häufigen Darbietung der Infostufe auch in Situationen führen, in denen der Fahrer keinen Spurwechsel plant. Systemaktionen, deren Rechtmäßigkeit der Fahrer aber bezweifelt, reduzieren die Akzeptanz des Bedieners für das System. Ein Systemansatz, der durch die Spurwechselwunschmodellierung die Situationen erkennt, in denen (auch ohne Blinkerbetätigung) ein Spurwechsel bevorsteht, kann in diesen Fällen helfen, überzählige Informationssignale zu reduzieren und den Fahrer optimal bei Spurwechselmanövern zu unterstützen.

6.5.1 Vorhersage des Querführungsverhaltens

Intrinsische Faktoren des Bedieners sind solange nicht direkt zugänglich, solange dieser seine Motivation und Ziele nicht explizit artikuliert. Für Fahrermodelle im Rahmen eines Assistenzsystems stehen sie somit nicht direkt zur Verfügung. Es gilt, Ansätze zu finden, die Rückschlüsse auf den intrinsischen Zustand des Fahrers erlauben. Im vorliegenden Fall besteht die Hauptaufgabe darin, einen Spurwechsel auch ohne Blinkerbetätigung frühzeitig zu erkennen. Die Erkennung eines Spurwechsels kann auf zwei Arten erfolgen. Einerseits existieren Ansätze, die aus fahrdynamischen Größen auf einen bevorstehenden Spurwechsel schließen wollen. Dazu werden im Regelfall Daten herangezogen, die mit bestehender fahrzeuginterner Sensorik fahrzeugbezogen erhoben werden können (z.B. Lenkwinkelverlauf, Querabweichung, Querbesehleunigung). Diese Eingangsgrößen werden in einem Fahrermodell verwendet, um das Querführungsverhalten zu prädisieren. In HACKL wurden die bestehenden Ansätze zur Spurwechselerkennung aufgegriffen und Schwellenwerte für Fahrdynamiksensoren, für Bildverarbeitung und Radardaten im Realfahrzeug untersucht [46]. Es zeigt sich, dass nur eine Videosensorik mit Informationen zur Querablage, Spurbreite und Straßenkrümmung den bevorstehenden Spurwechsel vorhersagen kann.

Im Folgenden soll deshalb ein Ansatz vorgestellt werden, der anhand von Daten der Videosensorik die Fahrtrajektorie des Ego-Fahrzeugs auswertet und durch Vorwärtsprädiktion

derselben einen bevorstehenden Spurwechsel erkennt (*trajektorienbasierter Ansatz zur Spurwechselerkennung*). Der trajektorienbasierte Ansatz macht es damit möglich, einen Spurübertritt in Voraussicht zu erkennen. Ob dieser auf einen absichtlich initiierten Spurwechsel oder ein ungewolltes Spurverlassen zurückgeht, ist auf den ersten Blick nicht zu erkennen. Dazu werden Ansätze verfolgt, anhand des charakteristischen Verlaufs der Trajektorie ein ungewolltes Spurverlassen (z.B. anhand kleinerer Lenkwinkel, kleinerer Ablageänderungen) von einem absichtlich initiierten Spurwechsel (z.B. anhand progressiver Ablageänderung) zu unterscheiden.

Die Erkennung eines Spurwechsels erfolgt im Rahmen dieser Arbeit mit Hilfe einer Motivationsabschätzung. Dazu werden all jene Parameter herangezogen, die Fahrer auch zur Entscheidungsfindung verwenden, um daraus den internen Zustand des Fahrers nachzubilden. Ein Spurwechsel kann durch vielerlei Gründe motiviert sein (z.B. Auffahren auf ein langsamerer Fahrzeug). Es gilt nun, die relevanten Situationen zu identifizieren, deren Erkennung durch interne und externe Sensoren sicherzustellen und geeignete Bewertungsschranken zur Motivationsableitung aus diesen Größen zu gewinnen. Im Folgenden soll ein solcher Ansatz zur Motivationserkennung beim Spurwechsel vorgestellt werden (*motivationsbasierter Ansatz zur Spurwechselwunscherkennung*).

6.5.1.1 Trajektorienbasierter Ansatz zur Spurwechselerkennung

In Zusammenarbeit der AUDI AG mit dem Lehrstuhl für Neuroinformatik der Ruhr-Universität Bochum wird an einem Ansatz gearbeitet, um einen Spurwechsel anhand der Analyse des bisherigen Fahrverlaufs (Trajektorie) des eigenen Fahrzeugs zu erkennen. Aufgrund des bisherigen Verlaufs der Querabweichung des Ego-Fahrzeugs wird der weitere Verlauf der Trajektorie vorhergesagt.

Den schematischen Ablauf der Vorwärtsprädiktion zeigt Bild 68. Ist die Querabweichung größer als die Schwellenwerte um die Fahrspurmitte, so wird auf Grund der letzten gemessenen Querabweichungen ein Polynom zweiten Grades interpoliert. Erreicht das Polynom innerhalb eines vorher definierten Zeitraums $d(p)$ die Fahrbahnmarkierungen, gilt ein zukünftiger Fahrspurwechsel als detektiert.

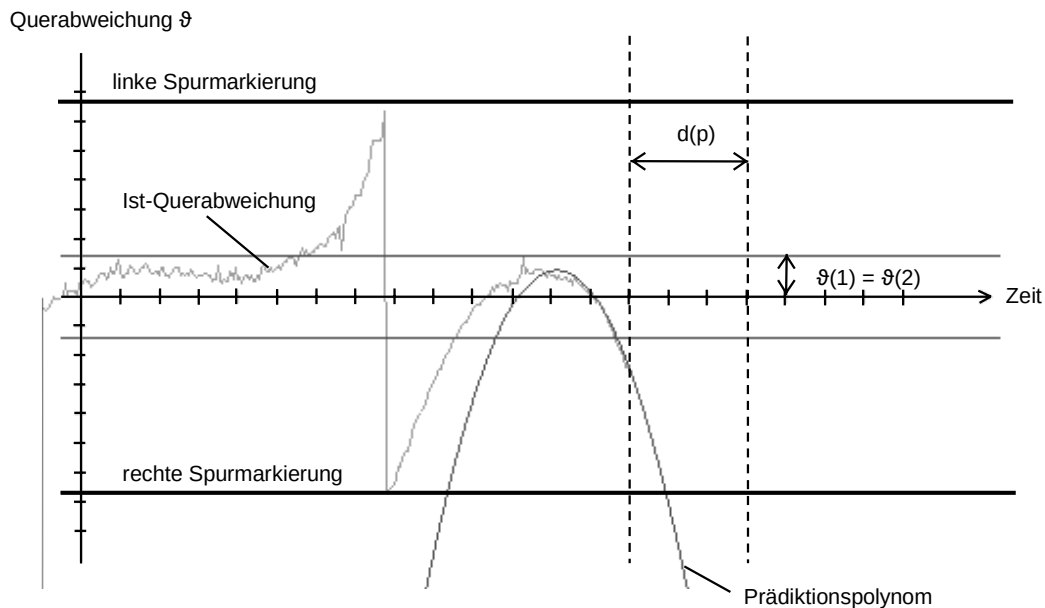


Bild 68: Trajektorienbasierter Ansatz zur Erkennung des Querführungsverhaltens

Das Ziel dieser Methode ist einerseits eine möglichst frühzeitige Detektion des Spurwechsels und andererseits, die Rate von Fehldetektionen so niedrig wie möglich zu halten. Um die Modellgüte bewerten zu können, wird eine „Fitnessfunktion“ erstellt, die korrekte Vorhersagen positiv, Fehldetektionen negativ bewertet. Hierzu erhält jeder vorhergesagte Spurwechsel je nach Zeitpunkt der Detektion einen Wert. Diese Werte werden über alle Spurwechsel mit dem Trainingsdatensatz summiert und stellen so die Güte der Parametrierung dar.

6.5.1.2 Motivationsbasierter Ansatz zur Spurwechselwunscherkennung

Beim Fahren auf einer Autobahn wird der Fahrer durch verschiedene Motivatoren zum Wechsel der Fahrspur veranlasst. Bild 69 zeigt nach FASTENMEIER ET AL. zahlreiche Gründe, die zu einem Spurwechselwunsch führen [32].

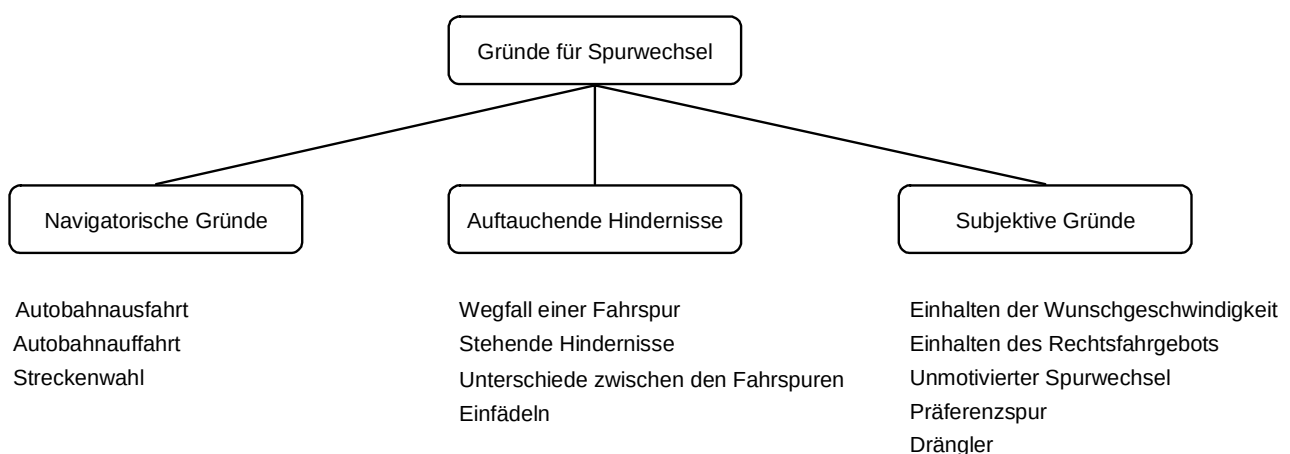


Bild 69: Kategorisierung von Spurwechselmanövern nach den Spurwechselgründen

Einer der wichtigen Motivatoren für einen Spurwechsel ist der Wunsch, eine bestimmte Wunsch- oder Zielgeschwindigkeit einzuhalten. Auf Autobahnen entsteht eine Behinderung immer dann, wenn ein Fahrzeug durch ein in dessen Spur fahrendes oder einscheres langsames Fahrzeug gezwungen wird, seine Geschwindigkeit zu verringern. Besteht in diesen Situationen die Gelegenheit, die Spur zu wechseln, nimmt der Fahrer diese wahr. Nach SPARMANN ist ein Maß für die Behinderung eine konstant angenommene Verzögerung, die das nachfolgende Fahrzeug für begrenzte Zeit einhalten muss, um danach in sicherem Zeitabstand dem Hindernisfahrzeug mit gleicher Geschwindigkeit folgen zu können [115]. Jeder Fahrer besitzt eine persönliche Toleranzschranke, ab der er bei gegebener Möglichkeit überholt. In einer Arbeit von KOPF sind die Toleranzschranken in einem Fahrsimulatorexperiment mit 16 Versuchspersonen auf einer zweispurigen Autobahn ermittelt worden [60]. Den Probanden wurde vor Fahrtantritt eine Wunschgeschwindigkeit zugewiesen, die sie bei einem Auffahr-/ Folgevorgang hinter einem Fremdfahrzeug mit freier Überholspur einhalten sollten. Es zeigt sich, dass die ermittelte Überholtoleranz aller Versuchspersonen zwischen 0 und 10 km/h liegt, wobei sie für jeden einzelnen Fahrer in mehreren Wiederholungen etwa konstant bleibt.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll dieser Ansatz im Rahmen einer Spurwechselmotivationserkennung weiterverfolgt werden. Dazu wird laufend überprüft, ob die Geschwindigkeit des Vordermanns sich von der Wunschgeschwindigkeit des Fahrers im Ego-Fahrzeug unterscheidet. Als Wunschgeschwindigkeit gilt dabei die Geschwindigkeit, die der Fahrer wählt, wenn er frei von Fremdeinflüssen (z.B. durch andere Verkehrsteilnehmer, Kurven, etc.) eine Fahrgeschwindigkeit wählen kann.

Dieser Ansatz beruht auf der Annahme, dass der Fahrer seine Motivation zum Spurwechsel hauptsächlich von der vor ihm liegenden Verkehrssituation abhängig macht. Der Blick nach vorne ist demnach motivationsentscheidend. Erst in einem zweiten Schritt wird diese Motivation mit der Situation seitlich und hinter dem Fahrzeug verglichen. Besteht eine Gefährdung bei der Durchführung des Spurwechsels wird der Fahrer trotz gleich bleibender Motivation auf das Spurwechselmanöver verzichten. Vereinfacht gesehen kommen im Längsverkehr nur vier Zustände vor: „Freie Fahrt“, „Auffahren“, „Folgen“ und „Freies Folgen“ [60]. Dazu wurde ein Modell erstellt, das fahrtbegleitend die Zustände erkennen kann und darauf aufbauend eine Spurwechselwahrscheinlichkeit berechnet. Nach BRANNOLTE sind relevante Objekte beim Auffahren, Folgen und freien Folgen maximal 150 m entfernt [9]. Zur Berechnung der Spurwechselmotivation werden innerhalb dieses Bereiches die Werte zur Wunschgeschwindigkeit, zum Abstand und zur Differenzgeschwindigkeit zum Vordermann ausgewertet.

6.5.2 Versuchsziel

Bild 70 zeigt zwei Ansätze zur Ansteuerung eines zweistufigen Assistenzsystems zur Unterstützung des Fahrers beim Spurwechsel. Der Basis-Ansatz aktiviert die Informationsstufe (beispielsweise der Außenspiegelanzeige), sobald sich ein Fahrzeug im Gefahrenbe-

reich auf der Nachbarspur befindet. Die Eskalation- oder Warnstufe wird dann aktiviert, wenn vom Fahrer der Blinker aktiviert wird und sich das Fremdfahrzeug weiterhin im Gefahrenbereich befindet. Dieser Ansatz nun hat die folgenden Nachteile: die Informationsstufe wird immer aktiviert, wenn ein Fremdfahrzeug den Gefahrenbereich besetzt, also auch, wenn der Fahrer gar keine Spurwechselabsicht zeigt. Will er die Spur wechseln, muss der Fahrer den Blinker betätigen, um die Eskalations- oder Warnstufe im Gefahrenfall zu aktivieren. Setzt er den Blinker nicht, verbleibt das System in der Informationsstufe sobald sich ein Fahrzeug im Gefahrenbereich befindet. Da die Signale der Informationsstufe unterschwellig ausgelegt sein können, besteht die Gefahr, dass diese übersehen werden können und es trotz Assistenzsystem zu einem Unfall kommt.

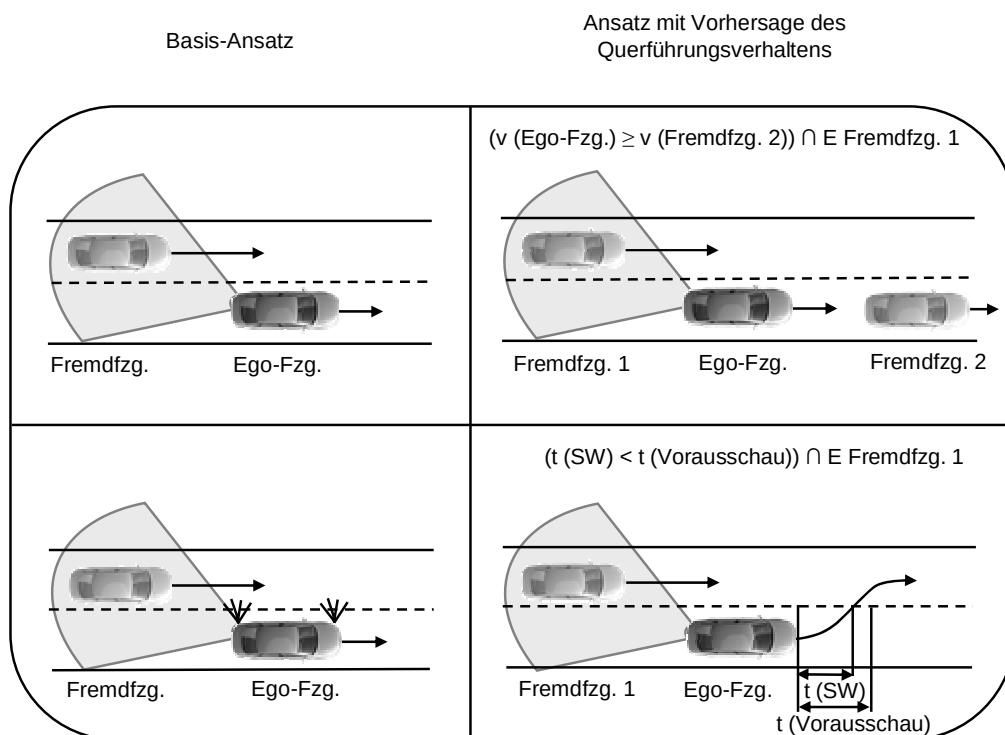


Bild 70: Ansätze zur Ansteuerung eines zweistufigen Assistenzsystems zur Unterstützung des Fahrers beim Spurwechsel

Für diesen Versuch wurde das Versuchsfahrzeug mit Ansätzen zur Vorhersage des Querführungsverhaltens versehen. Diese aktivieren die Informationsstufe des Querführungsassistenten nur dann, wenn aufgrund der das eigene Fahrzeug umgebenden Verkehrssituation (hier: Auffahren auf langsames Vorderfahrzeug) von einem bevorstehenden Spurwechsel ausgegangen werden kann. Besteht keine Spurwechselmotivation, ist auch keine Informationsstufe aktiviert. Ein trajektorienbasierter Ansatz diente zur eigentlichen Prädiktion des Spurwechselvorgangs und modellierte das Fahrerverhalten. Setzt der Fahrer keinen Blinker, will aber trotzdem absichtlich die Fahrspur wechseln, ist dieses Modell in der Lage, den bevorstehenden Spurwechsel zu erkennen. Damit kann die eskalierte Warnstu-

fe bei Gefährdung durch ein Fahrzeug auf der Zielspur auch aktiviert werden, wenn keine Blinkerbetätigung vorliegt.

6.5.3 Hypothesenbildung

Die Spurwechselmotivationserkennung kann dazu beitragen, Situationen, in denen die Informationsstufe ohne Spurwechselwunsch aktiviert wird, deutlich zu reduzieren. Zudem wird der Fahrer nicht gezwungen, den Blinker zu setzen, sondern wird immer optimal vom System über die Gefahrenlage informiert. Die Hypothese lautet damit:

Hypothese 6.5-1: Die Ansätze zur Modellierung der Spurwechselmotivation und zur Abschätzung eines bevorstehenden Spurwechsels unterstützen den Fahrer in der Vorbereitung und Durchführung seines Spurwechsels erheblich.

6.5.4 Versuchsmethodik

Die eingangs dargestellten Versuchsziele wurden in den Rahmen eines experimentellen Fahrversuchs integriert. Die Untersuchung fand im Realfahrzeug auf öffentlichen Straßen statt, um den Befragten einen realistischen Eindruck von den Systemteilen zu vermitteln. Die relevanten Fragestellungen sollten mit Hilfe eines Fragebogens beantwortet werden. Die Versuchsteilnehmer hatten die Aufgabe, Fragen zu ihrem Eindruck auf jeweils 6-stufigen Ordinalskalen zu beantworten.

6.5.5 Versuchspersonen

Der Fahrversuch wurde mit 12 Probanden durchgeführt, die Mitarbeiter der AUDI AG waren. Eine detailliertere Beschreibung der Versuchsgruppe zeigt Tabelle 34.

Tabelle 34: Eigenschaften der Versuchsprobandengruppe

Charakteristik	Wertebereich
Anzahl Versuchspersonen	12 Personen
Alter	durchschnittlich 25,5 Jahre (s = 4,4 Jahre)
Jährliche Fahrleistung	durchschnittlich 26.583 km (s = 14.247 km)
Fahrerfahrung	durchschnittlich 7,3 Jahre (s = 4,6 Jahre)

6.5.6 Versuchsdurchführung

Der Versuch fand auf einer meist dreispurigen Autobahn statt. Die Signaldarbietung ist laut den vorstehend dargelegten Ansätzen abhängig von der Präsenz eines Fahrzeugs auf der Zielspur. Da diese Situation aber eine Gefährdung anderer Verkehrsteilnehmer bedeutet, wurden die Fahrer gebeten, in Situationen, in denen sich ausdrücklich kein Fahrzeug auf den Nachbarspuren befand, die Annäherungsvorgänge an vorausfahrende Fahrzeuge zu simulieren. Zur Beurteilung der Spurwechselerkennung wurden die Systemaktionen aber so präsentiert, als ob sich ein Fahrzeug auf der Nachbarspur befände. Die Fahrer hatten so die Möglichkeit, den Zeitpunkt, den Unterstützungsgrad und die Einbindung der Systemsignale in den gewohnten Fahrvorgang zu beurteilen. Nach Abschluss der Versuchsfahrt, die pro Proband rund 90 Minuten auf einer Fahrtstrecke von 160 Kilometer in Anspruch nahm, wurden diese gebeten, den Fragebogen zu komplettieren.

6.5.7 Versuchsergebnisse

Die Systeme wurden den Probanden folgendermaßen präsentiert: Stellte das Modell zur Spurwechselerkennung die Motivation des Fahrers zum Spurwechsel fest (z.B. bei einem schnellen Auffahren auf den Vordermann), wurde die gelbe Informationsanzeige aktiviert. Wenn das Modell aufgrund der Prädiktion der Fahrtrajektorie auf die Initialisierung des Spurwechselvorgangs schloss, markierte die rote Warnstufe diesen Zeitpunkt. Die Befragten sollten abschließend wiedergeben, inwieweit ihre Überholmotivation bzw. der Beginn ihres Spurwechsels mit den Systemsignalen übereinstimmte. Die Ergebnisse, die in Bild 71 verdeutlicht sind, zeigen, dass die Modellierung der Fahrermotivation und des Fahrerhaltens durchweg zufrieden stellende Ergebnisse liefern. So werden sowohl die Zeitpunkte der Signaldarbietung, als auch das unterstützende Potential der Spurwechselerkennung hervorgehoben.

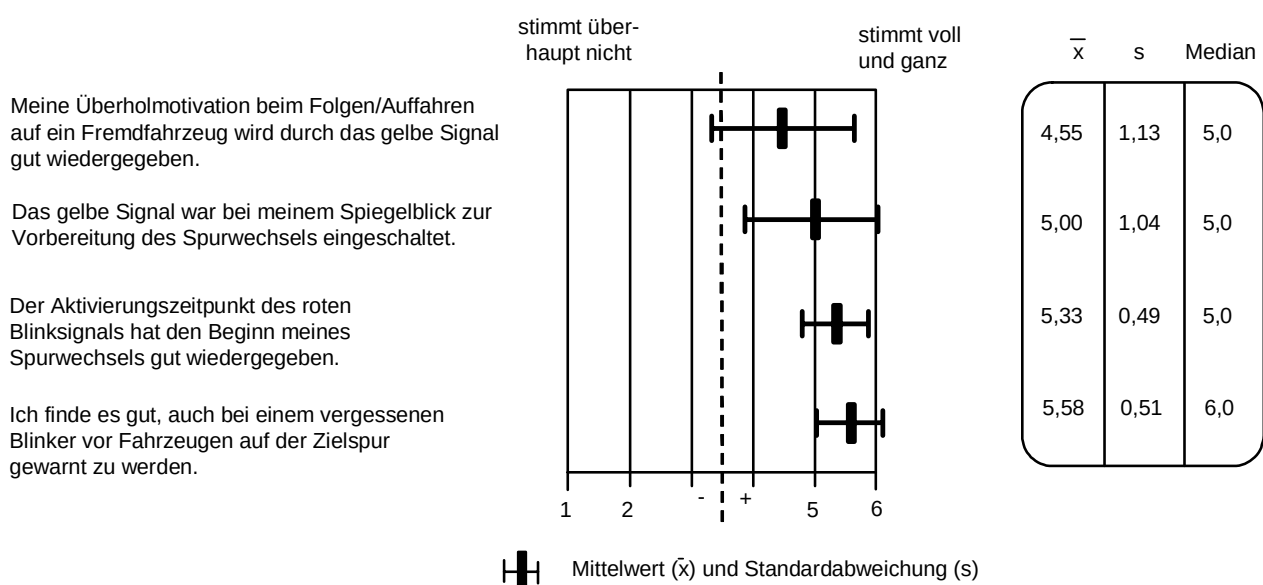


Bild 71: Ergebnisse zur Spurwechselerkennung

Noch deutlicher wird dies, bei der Befragung der Versuchsteilnehmer zu einigen beschreibenden Eigenschaften der Spurwechselerkennung. Bild 72 zeigt, dass die Spurwechselerkennung in der im Rahmen des Versuchs präsentierte Auslegung erfolgreich in den Querführungsassistenten eingebunden werden kann.

Generell halte ich die Spurwechselprädiktion als Ergänzung des Querführungsassistenten für...

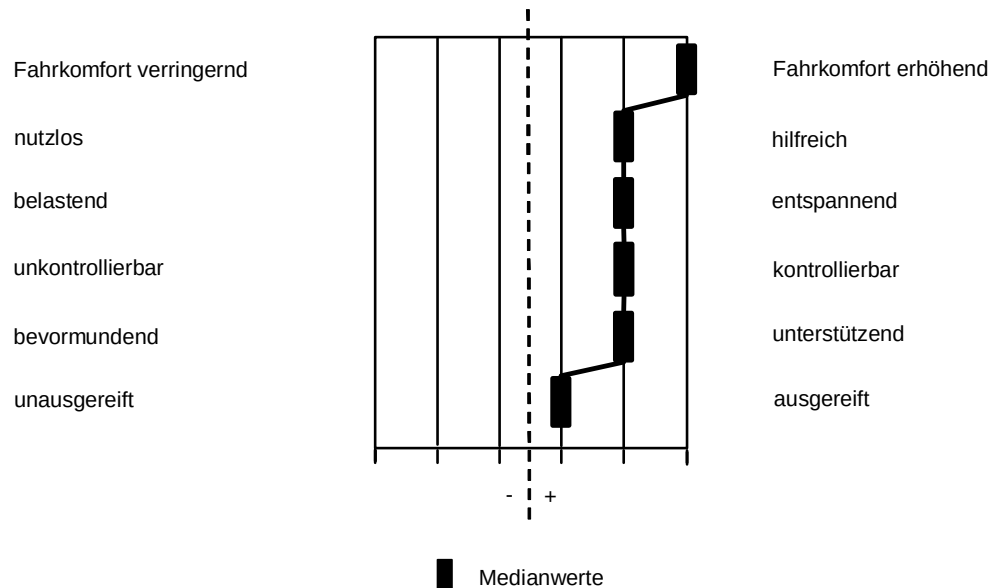


Bild 72: Ergebnisse zur Spurwechselerkennung

6.5.8 Diskussion

Die Befragung zeigt, dass die vorgeschlagenen Modelle zur Spurwechselerkennung und zur Einschätzung der Spurwechselmotivation zufrieden stellend funktionieren. Der Ansatz zur Nachbildung der Spurwechselmotivation ist in der Lage, den Fahrer über ein Fahrzeug auf der Nachbarspur zu informieren, wenn er aufgrund der Verkehrssituation einen Spurwechsel anstrebt und mit der Vorbereitung desselben beginnt. Er kann damit beispielsweise die Steuerung der Informationsanzeige übernehmen, die dem Fahrer dann wesentlich gezielter die relevanten Informationen bereitstellen kann. Der trajektorienbasierte Ansatz entscheidet, wann genau es zu dem physikalischen Spurwechselmanöver kommt. Er kann damit den Fahrer auch ohne dessen Blinkerbetätigung vor einem gefährlichen Spurwechsel warnen und steuert damit die Warnstufe. Die Ansätze zur Modellierung der Spurwechselmotivation und zur Abschätzung eines bevorstehenden Spurwechsels unterstützen den Fahrer insgesamt bei der Vorbereitung und Durchführung seines Spurwechsels erheblich (Hypothese 6.5-1).

6.6 Zusammenfassung

Zu Beginn dieses Kapitels wurden grundlegende Anforderungen an die Mensch-Maschine-Schnittstelle eines Querführungsassistenten gestellt. Anschließend sollten drei umfangreiche Fahrversuche dazu dienen, nähere Erkenntnisse zur kundenorientierten Systemfunktionalität zu gewinnen.

Der Fahrversuch mit Blick auf die Schnittstellenmodalität zeigt, dass eine zusätzliche Beanspruchung des Fahrers durch das System nicht erkennbar ist, eine genaue Analyse der Daten sogar vermuten lässt, dass sich das subjektive Beanspruchungsempfinden mit Hilfe des Querführungsassistenten optimieren lässt. Unter Berücksichtigung der vorstehend aufgelisteten Ansätze zur benutzergerechten Auslegung des Systems gelangt man zu der Erkenntnis, dass die Fahrer die Systemfunktionalität bereits nach kurzer Erprobungsphase verstehen. Der Fahrversuch gab keinerlei Hinweise auf eine sicherheitskritische Veränderung des Fahrverhaltens der beteiligten Personen. Diese bewerten den Querführungsassistenten in wichtigen Kriterien zur Akzeptanzmessung positiv. Es ergab sich im Rahmen der Versuchsreihe kein signifikanter Unterschied zwischen unimodaler Systemausprägung (korrigierende Lenkmoment zur Spurwechsel- und zur Spurverlassenswarnung) und multimodaler Systemausprägung (optische Anzeige im Außenspiegel zur Spurwechselunterstützung und korrigierendes Lenkmoment zur Spurverlassenswarnung) hinsichtlich der Kriterien Fahrerbeanspruchung, Fahrverhalten, Systemverständnis und Akzeptanz.

Bereits aus der Betrachtung des Standes der Technik in Kapitel 2 ist zu vermuten, dass der Grad der Automatisierung einen wesentlichen Einfluss auf die Akzeptanz eines Assistenzsystems durch den Kunden aufweist. Der Fahrversuch zum Unterstützungsgrad unterstützt diese Annahme. Die Varianten, welche den Fahrer mit geringeren Lenkmomenten und im Falle der Spurhalteunterstützung unter Berücksichtigung eines Fahrkorridors unterstützen, werden durchweg besser bewertet als ihre Pendants höheren Eingriffsgrades. Anhand einiger Akzeptanzparameter zeigt sich im Vergleich mit der Variante des Querführungsassistenten, der innerhalb des Fahrversuchs zur Schnittstellenmodalität aus Kapitel 6.3 präsentiert wurde, dass die Varianten niedrigeren Unterstützungsgrades bei den Probanden größeren Anklang finden und eine hochautomatisierte Unterstützung des Fahrers bei Spurwechsel und Spurhaltung aller Voraussicht nach zur Zeit geringe Verkaufschancen aufweist.

Als eindeutiges Zeichen für einen bevorstehenden, absichtlichen Spurwechsel dient die Blinkerbetätigung. Der Fahrversuch zur Spurwechselerkennung untersucht Ansätze, mit deren Hilfe man auch ohne Blinkerbetätigung aus der Analyse der Fahrtrajektorie und der umgebenden Verkehrssituation auf einen Spurwechsel schließen kann. Die Auswertung der Probandenbefragung nach Abschluss der Versuchsreihe zeigt, dass die vorgestellten Ansätze durchaus in der Lage sind, die Signale des Querführungsassistenten zielgenauer auszulegen und Fehlwarnungen zu reduzieren.

7 Bewertung des Gesamtsystems

Die Bewertung des Gesamtsystems erfolgt im Rahmen eines Fahrversuchs, der mit Hilfe des in Kapitel 5 vorgestellten Versuchsträgers durchgeführt wurde. Inklusive des nachfolgend dargestellten Fahrversuchs absolvierte das Versuchsfahrzeug damit im Zuge der in dieser Arbeit vorgestellten Versuchsreihen zusammengerechnet rund 25.000 km, um den Querführungsassistenten in verschiedene Probandenuntersuchungen präsentieren und bewerten zu können.

Die Festlegung des Sensor- und Funktionsumfangs der in diesem Gesamtversuch präsentierten Lösung und die noch abschließend zu klärenden Sachverhalte, ergeben sich aus den vorher durchgeführten und in den vorhergehenden Kapiteln beschriebenen Untersuchungen und Fahrversuchen in einer in Tabelle 35 verdeutlichten Weise.

Der Querführungsassistent besteht nunmehr aus einer Spurverlassenswarnung, die den Fahrer bei drohendem, ungewolltem Verlassen der Fahrspur über eine geeignete Schnittstelle warnt. Die abschließende Definition der geeigneten Schnittstelle und damit die Entscheidung zwischen Lenkmoment und Lenkradvibration zur Spurverlassenswarnung ist Aufgabe des Gesamtversuchs. Auf eine andauernde Unterstützung des Fahrers in der Spurhaltung (Spurhalteunterstützung) wird aufgrund der Ergebnisse aus Kap. 6.4 zur Akzeptanz hochautonomer Lösungen verzichtet.

Der Unterstützungsumfang des Querführungsassistenten wird durch einen Spurwechselassistent ergänzt. Dieser informiert den Fahrer vor Beginn des Spurwechsels über Fahrzeuge auf den Nachbarspuren. Setzt der Fahrer nun trotzdem den Blinker, um einen Spurwechsel durchzuführen, eskaliert das System die Warnung. Die abschließende Definition der geeigneten Schnittstelle und der geeigneten Signale ist wiederum Aufgabe dieses Gesamtversuchs. Auf eine andauernde Unterstützung des Fahrers in der Durchführung des Spurwechsels (Spurwechselunterstützung) wird aufgrund der Ergebnisse aus Kap. 6.4 zur Akzeptanz hochautonomer Lösungen verzichtet.

Die Ansätze zur Spurwechselerkennung, wie sie in Kap. 6.5 dargestellt und im Rahmen des Fahrversuchs bewertet wurden, waren nicht Teil der Gesamtbewertung, da deren technischer Reifegrad für die angestrebte baldige Einführung des Systemansatzes noch nicht ausreicht, diese aber als Ergänzungslösung jederzeit auf die als abschließend festgestellte Systemlösung aufgesetzt werden können.

Tabelle 35: Ergebnisse der vorangehenden Untersuchungen/Versuche und ihre Relevanz für den Fahrversuch zur Bewertung des Gesamtsystems

Untersuchung/ Versuch	(Haupt-) Fragestellung	Ergebnis(-se) für Gesamtsystem
Unfalldatenanalyse (Kap. 3.1)	Wie hoch ist der Anteil von Unfällen in der Querführung am Gesamtunfallgeschehen? Welche sind die charakteristischen Merkmale von Querführungsunfällen?	Ein QFA muss Unfälle in der Spurhaltung (Autobahn und Landstraße) und beim Spurwechsel (Autobahn) vermeiden helfen.
Multimediabefragung (Kap. 3.2)	Welche Kundenpräferenz ergibt sich bezüglich charakteristischer Systemmerkmale bereits in einer frühen Phase der Systementwicklung im Rahmen einer Multimediabefragung?	Erwünscht sind: Unterstützung durch den QFA auf Autobahnen, Landstraßen und innerstädtischen Hauptrouten; eine automatische Aktivierung ab ca. 60 km/h; eine Deaktivierungsmöglichkeit über Tastendruck; Spurwechselunterstützung nach links und rechts.
Expertenbefragung zur Sensorarchitektur (Kap. 3.3)	Welche Sensorplattform garantiert bestmöglich (relativ zu einem zu erarbeitenden Kriterienkatalog) eine Umsetzung des Funktionsumfangs eines QFA?	Eine aus Mono-Videosensorik und Mittelbereichs-Radarsensoren bestehende Sensortopologie ist bestmöglich zur Sicherstellung der Funktion eines QFA geeignet.
Simulatorversuch zu Informationskanälen (Kap. 4.2)	Welche Art von Signal (akustisches Signal, Lenkradvibration, Sitzvibration, Lenkmoment) führt im Gefahrenfall am schnellsten zu einer angemessenen Lenkreaktion?	Der QFA soll haptische Signale (dort besonders Lenkradvibration und Lenkmoment) den akustischen Signalen vorziehen.
Fahrversuch zur Schnittstellenmodalität (Kap. 6.3)	Sind bei Darbietung der Systemsignale des QFA über eine unimodale Schnittstelle (Lenkmomente) im Vergleich zu einer multimodalen Schnittstelle (Lenkmomente und Außenspiegelanzeige) negative Auswirkungen hinsichtl. Fahrerbeanspruchung, Fahrverhalten, Systemverständnis und Akzeptanz zu erwarten?	Der Unterschied zwischen uni- und multimodaler Systemausprägung ist innerhalb dieses Fahrversuches statistisch nicht signifikant. Weitere Klärung zum HMI des QFA anhand umfangreicherer Stichprobe im Rahmen des Gesamtversuchs ist notwendig.
Fahrversuch zum Unterstützungsgrad (Kap. 6.4)	In welchem Automatisierungsgrad soll der QFA den Fahrer bei Spurhalten und Spurwechsel unterstützen?	Eine hochautomatisierte Auslegung des Systems stößt auf wenig Akzeptanz. Die Auslegung des QFA soll deshalb als informierendes/warnendes aber nicht als autonom eingreifendes System erfolgen.
Fahrversuch zur Spurwechselerkennung (Kap. 6.5)	Verbessert eine Erweiterung des QFA um eine motivationsbasierte Vorhersage des Spurwechselwunsches die Fahrerunterstützung bei Vorbereitung und Durchführung eines Spurwechsels erheblich?	Die vorgestellten Ansätze sind geeignet, den bevorstehenden Spurwechsel anhand einer Motivationsanalyse und anhand der Fahrtrajektorie auch ohne die Betätigung des Blinksignals durch den Fahrer zu detektieren. Aufgrund des Reifegrades ist diese Funktionalitätserweiterung aber nicht Teil des zu empfehlenden Gesamtsystems.

↓
Fahrversuch zur Bewertung des Gesamtsystems
(Kap. 7)

7.1 Versuchsziel

Dieser abschließende Fahrversuch hat zum Ziel, den in dieser Arbeit thematisierten Querführungsassistenten als Gesamtsystem zu bewerten. In einem ersten Fragenkomplex sollten die Versuchsteilnehmer die im Versuchsträger implementierten Schnittstellen zwischen System und Fahrer nach verschiedenen Kriterien (z.B. Wahrnehmbarkeit, Beeinflussung, Gesamteindruck) bewerten (siehe Kap. 7.6.2 „Wahrnehmbarkeit und Signalgestaltung“ sowie Kap. 7.6.3 „Bewertung der Mensch-Maschine-Schnittstellen“). Die Ergebnisse dienen dazu, die Signale und Systemreaktionen zur Unterstützung des Fahrers bei der Spurhaltung sowie bei Spurwechseln festlegen zu können. Die möglichen Kombinationen zeigt Tabelle 36. Zur Unterstützung des Fahrers beim Spurwechsel wird den Versuchsteilnehmern neben den Signalen im Außenspiegel auch eine Lösung zur Bewertung vorgelegt, die mit Hilfe der Lenkmomente die optischen Signale um haptische Signale ergänzt. Die Verhinderung des ungewollten Abkommens von der Fahrbahn kann entweder über Lenkmomente oder über eine Vibration des Lenkrades erfolgen (siehe Kap. 7.6.4 „Auswahl der Systemfunktionalität“).

Tabelle 36: Varianten und deren Benennung im Rahmen des Fahrversuchs

		Warnung vor Gefährdung beim gewollt initiierten Spurwechsel über...	
		Außenspiegel- anzeige	Außenspiegelanzeige & Lenkmoment
Warnung bei unbeabsichtigtem Fahrspurverlassen über...	Lenkrad- vibration	Variante QFA-1	Variante QFA-3
	Lenk- moment	Variante QFA-2	Variante QFA-4

Der Versuch widmete sich zudem der Frage, inwieweit die Reaktionen des Systems von den Benutzern als rechtmäßig und rechtzeitig verstanden werden (siehe Kap. 7.6.5 „Rechtzeitigkeit und Rechtmäßigkeit“).

Zudem soll dieser Versuch den interessanten Aspekt der Gebrauchssicherheit und deren Einschätzung durch potentielle Käufer von Assistenzsystemen beleuchten (siehe Kap. 7.6.6 „Gebrauchssicherheit“). Die Versuchsergebnisse rundet eine generelle Einschätzung des Querführungsassistenten durch die Versuchsteilnehmer ab (siehe Kap. 7.6.7 „Bewertung des Gesamtsystems“). Im Rahmen dieser Befragung soll auch auf die Preisbereitschaft näher eingegangen werden, die von potentiellen Kunden für den vorliegenden Querführungsassistenten erwartet werden kann. Auch deshalb wurden ein großer Wert und ein erhöhter Aufwand auf die Auswahl und Zusammenstellung des Probandenpools

gelegt, damit die Ergebnisse aus der statistischen Auswertung des Versuchs als repräsentativ für Fahrer der Oberklasse und der gehobenen Mittelklasse gelten können.

7.2 Methodik

Die eingangs dargestellten Versuchsziele wurden in den Rahmen eines experimentellen Fahrversuchs integriert. Dieser fand auf öffentlichen Straßen statt, um das Daten- und Befragungsmaterial unter realistischen Fahrbedingungen zu gewinnen. Der Fahrversuch wurde in Zusammenarbeit zwischen dem Autor der vorliegenden Arbeit als Repräsentant der AUDI AG und dem Bereich Innovations- und Marktforschung des TÜV Rheinland im Rahmen der Forschungsinitiative INVENT durchgeführt. Den Beteiligten des TÜV oblag die Auswahl und Betreuung der Versuchspersonen, die personelle Begleitung des Fahrversuchs durch einen Versuchsleiter und einen Protokollanten sowie die Gewinnung der unbearbeiteten Befragungsdaten. Der Autor stellte seinerseits das in Kapitel 5 vorgestellte Versuchsfahrzeug mit dem beschriebenen Querführungsassistenten als Versuchsobjekt zur Verfügung. Zudem begleitete der Autor dieser Arbeit für den gesamten Zeitraum den Versuch vor Ort als inhaltlicher und technischer Koordinator. Bei der Festlegung der Befragungsziele, der logistischen und inhaltlichen Versuchsplanung und der Gestaltung des Fragebogens arbeiteten beide Parteien gleichberechtigt zusammen. Die statistische Auswertung und Interpretation der gewonnenen Daten stand beiden beteiligten Parteien zu.

Tabelle 37: Bewertungskriterien und angewandter Methodenumfang

Bewertungskriterium	Methoden
Warnehmbarkeit und Gestaltung der verschiedenen Signale der Mensch-Maschine-Schnittstelle	- Vorherfragebogen zur Gewinnung statistischer Daten zum Probandenpool - Explorationsfahrt verschiedener Systemvarianten; die Systemreaktion wird durch die Versuchsteilnehmer provoziert - Fragebogen während der Fahrt, die Bearbeitung erfolgt durch Versuchsleiter - Methode des "lauten Denkens", Erfassung erfolgt durch Protokollanten - Nachherfragebogen zur Einschätzung der Gebrauchssicherheit des Systems - statistische Auswertung mit Hilfe des Statistiktools SPSS
Auswahl der präferierten Mensch-Maschine-Schnittstelle	
Rechtzeitigkeit und Rechtmäßigkeit der Systemaktionen	
Gebrauchssicherheit des Querführungsassistenten	
Bewertung des Gesamtsystems	

Tabelle 37 zeigt die Methodik zur Gewinnung und Auswertung der verschiedenen Bewertungskriterien im Überblick. Im Rahmen eines Vorher-Fragebogens wurden statistische Daten zum Probandenpool gewonnen. Die Fragen zum Systemeindruck erfolgten an Probanden, die frei von Vorkenntnissen über das System (d.h. ohne Instruktionen und ohne Vorwissen über das vorliegende oder ein ähnliches System) nach einer Explorationsfahrt

befragt wurden. Die Fahrer wurden vor Beginn lediglich über die Bedienung des Fahrzeugs instruiert, eine Erklärung des Assistenzsystems oder der zu erwartenden Aktionen des Systems erfolgte nicht, um auch die spontanen Kommentare bei erstmaligem Kontakt mit dem System einfangen zu können. Der subjektive Eindruck des Fahrers zu Teilen des Systems oder zum Gesamtsystem wurde mit Hilfe eines Fragebogens erfasst (siehe Anhang A). Die Versuchsteilnehmer hatten dazu während der Fahrt die Aufgabe, bestimmte Aussagen zu ihrem Eindruck auf einer 5-stufigen Ordinalskala von „stimme zu“ bis „stimme nicht zu“ zu bewerten. Zudem sollten diverse Fragen beantwortet werden, in denen sich die Probanden wiederum auf einer 5-stufigen Ordinalskala zwischen verschiedenen antagonistisch formulierten Eigenschaftspaaren (z.B. „gut“ vs. „schlecht“) festlegen mussten. Die Fragen wurden dabei vom Versuchsleiter gestellt, er übernahm nach Beantwortung der Frage durch die Versuchsperson auch das Ausfüllen des Fragebogens. Während der Fahrt erfolgten die Fragen zur Wahrnehmung und Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle, zur Auswahl der präferierten Mensch-Maschine-Schnittstelle, zur Rechtzeitigkeit und Rechtmäßigkeit der Systemaktionen und zur Bewertung des Gesamtsystems. Nach Abschluss der Fahrt wurde im Rahmen eines Nachher-Fragebogens die Meinung zur Gebrauchssicherheit des Systems erfragt.

7.3 Versuchspersonen

Bei der Auswahl der Probanden wurde zwingend darauf geachtet, eine Stichprobe zusammenzustellen, die in Alter, Geschlechterverteilung, Fahrerfahrung und Fahrzeugklasse als repräsentativ für Oberklassefahrer gelten kann. Diese Prämisse leitet sich aus der generellen Marktpolitik der Automobilhersteller ab, neue Komfort- oder Sicherheitssysteme zuerst für Fahrzeuge der gehobenen Klassen anzubieten. Die Versuchsteilnehmer durften zudem über keinerlei Erfahrung mit dem vorliegenden System oder einem anderswie gearbeteten prototypisch umgesetzten elektronischen System vorweisen.

Die Stichprobe des Gesamtversuchs setzte sich aus 22 Personen zusammen. Eine nähere Beschreibung zeigt Tabelle 38. Das Durchschnittsalter der 5 Frauen und 17 Männer betrug 46,9 Jahre ($s=12,0$). Als Vielfahrer gelten im Folgenden die 10 Fahrer, die eine Jahresfahrleistung aufweisen, die größer als 20.000 km ist. Die Gruppe der restlichen 12 Personen erreicht Fahrleistungen bis zu 20.000 km und wird im Folgenden als Normalfahrer bezeichnet. Die Probandengruppe kann als repräsentativ für die Fahrergruppe von Oberklasselimousinen gelten.

Tabelle 38: Eigenschaften der Versuchsprobandengruppe

Charakteristik	Wertebereich				
Anzahl Versuchspersonen	22 Personen				
Geschlecht	weiblich 5 Personen		männlich 17 Personen		
Alter	durchschnittlich 46,9 Jahre (s=12,0 Jahre) im Bereich zwischen 21 und 73 Jahren				
Jährliche Fahrleistung [km]	< 5.000 5%	5.001-10.000 5%	10.001-15.000 32%	15.001-20.000 5%	20.001-25.000 27%
Fahrzeugklasse	Oberklasse 23%		gehobene Mittelklasse 64%		Sportwagen, Van, Cabrio 13%

7.4 Versuchsaufbau

Das Versuchsfahrzeug wurde mit dem Querführungsassistenten in im Folgenden beschriebenen Umfang ausgestattet. Die Betätigung des Blinkers stellte das alleinige Kriterium für den Fahrerwunsch zum Spurwechsel sein, ohne Blinkerbetätigung ging das System beim Abkommen aus der Spur von einem ungewollten Fall aus. Das Lenkmoment zeigte dabei immer weg von der Gefahr in Richtung Fahrbahnmitte, hatte eine Größe von 1,5 Nm und wurde für 1s dargeboten. Die Lenkradvibration als ungerichtetes, haptisches Signal wurde im Gefahrenfall für jeweils 1s aktiviert. Zur Unterstützung beim Spurwechsel konnte eine Informationsanzeige in beiden Außenspiegeln aktiviert werden. Bei Fahrzeugen, die sich neben dem eigenen Fahrzeug befinden oder schnell auf der Nachbarspur auffahren, dient diese Anzeige zur Vorbereitung des Spurwechsels. Das Signal war dabei als gelbe Daueranzeige unterschwellig ausgelegt. Das heißt, es war vom Fahrer nur bei einem direkten Blick in den Außenspiegel sichtbar. Es erfolgte kein Reiz zur Blickzuwendung beispielsweise mit Hilfe einer blinkenden Anzeige oder einer Intensitätssteigerung. Zusätzlich zur Informationsstufe konnte der Fahrer bei Gefährdung während eines gewollt initiierten und über die Blinkerbetätigung signalisierten Spurwechsels über ein rot blinkendes Signal im Außenspiegel gewarnt werden. Die Anzeige blinkte dabei mit voller Leuchtstärke mit einer Frequenz von 5 Hz, und hatte durch diese überschwellige Auslegung zur Folge, dass der Fahrer, auch wenn er seinen Blick auf die Straße richtete, durch das blinkende, hochintensive Signal zu einem Blick auf den Spiegel bewegt werden konnte.

7.5 Versuchsdurchführung

Vor Beginn des Versuchs wurde den Versuchsteilnehmern in den Räumlichkeiten des TÜV Rheinland ein Fragebogen vorgelegt, der Fragen zu Alter, Geschlecht, Kilometerleistung und derzeitig genutztem Fahrzeug stellte. Die Probanden waren zudem dazu angehalten, Fragen zu ihrem Fahrstil und zu ihrem Verhältnis zu neuen Technologien im Allgemeinen und zu ihrer Erfahrung mit verschiedenen Fahrzeugausstattungen zu beantworten. Die anschließende Versuchsfahrt führte die Fahrerinnen und Fahrer auf verschiedene zwei- bzw. dreispurige Autobahnen im Großraum Köln. Nach Absolvierung des ersten Versuchsabschnitts diente ein kurzer Halt dazu, die Fragen zu den bis dahin erfahrenen Versionen des Querführungsassistenten zu komplettieren. Die Erprobung der Spurhalteunterstützung erfolgte auf dem letzten Teilstück. Jeder Versuchsteilnehmer bewegte insgesamt das Versuchsfahrzeug über eine Strecke von rund 160 Kilometer. Da die Probanden angehalten waren, die Richtgeschwindigkeit von 130 km/h einzuhalten, ergab sich pro Person eine Versuchsdauer von 2 Stunden (Fahrzeit zuzüglich Vorher- und Nachher-Befragung).

7.6 Versuchsergebnisse

Die nachfolgend dargestellten Versuchsergebnisse werden in einzelnen Ergebnisblöcken vorgestellt. Eine Diskussion der Ergebnisse rundet diese Untersuchung ab.

7.6.1 Beschreibung und Einstellung des Probandenpools

Durch die Auswertung des Vorher-Fragebogens, der von den Versuchspersonen vor Fahrtantritt bearbeitet wurde, ergeben sich zahlreiche Hinweise auf die generelle Akzeptanz und Notwendigkeit von fahrerunterstützenden Maßnahmen sowie auf die Einstellung zu innovativen, technischen Lösungen.

Auf die Frage, ob die Versuchspersonen auf Autobahnen schon einmal in eine kritische Situation geraten waren, weil sie beim Spurwechsel ein anderes Fahrzeug übersehen hatten, verneinten nur 6 von 21 Befragten. Die restlichen 15 (=71%) Personen können sich an einen oder mehrere Vorfälle erinnern, in denen ihr Spurwechsel zu einer kritischen Situation geführt hat. Durch ein von ihnen verschuldetes, unbeabsichtigtes Abkommen von der Fahrspur sind 5 von 21 Versuchspersonen (=24%) schon mindestens einmal in eine Gefahrensituation geraten. Dieses Ergebnis zeigt, dass Fehler beim Spurwechsel als ein für die meisten Fahrer bekanntes Ereignis gelten können. Eine Unterstützung des Fahrers in diesem Manöver wird also aufgrund der vorliegenden Erfahrungswerte von den meisten Systembenutzern verstanden werden können. Die Anzahl derjenigen, die sich an eine Situation erinnern können, die auf ein unabsichtliches Abkommen aus der Fahrspur zurückzuführen ist, ist geringer. Das kann eine Argumentation des Systemnutzens schwerer ma-

chen, da Erfahrungswerte bei einer Mehrzahl der potentiellen Benutzer fehlen. Trotzdem soll an dieser Stelle noch einmal auf die Ergebnisse aus der Unfalldatenanalyse hingewiesen werden. Diese zeigen, dass die Spurverlassensunfälle im Regelfall mit weit überdurchschnittlichen Unfallfolgen verbunden sind. Diese Erkenntnis gilt es, an die potentiellen Kunden heranzutragen, ein Situationsbewusstsein für die Fälle von spurverlassensinduzierten Gefahrensituationen (aufgrund von Müdigkeit, Ablenkung) zu schaffen und damit die Notwendigkeit eines Assistenzsystems zur Spurhalteunterstützung zu begründen.

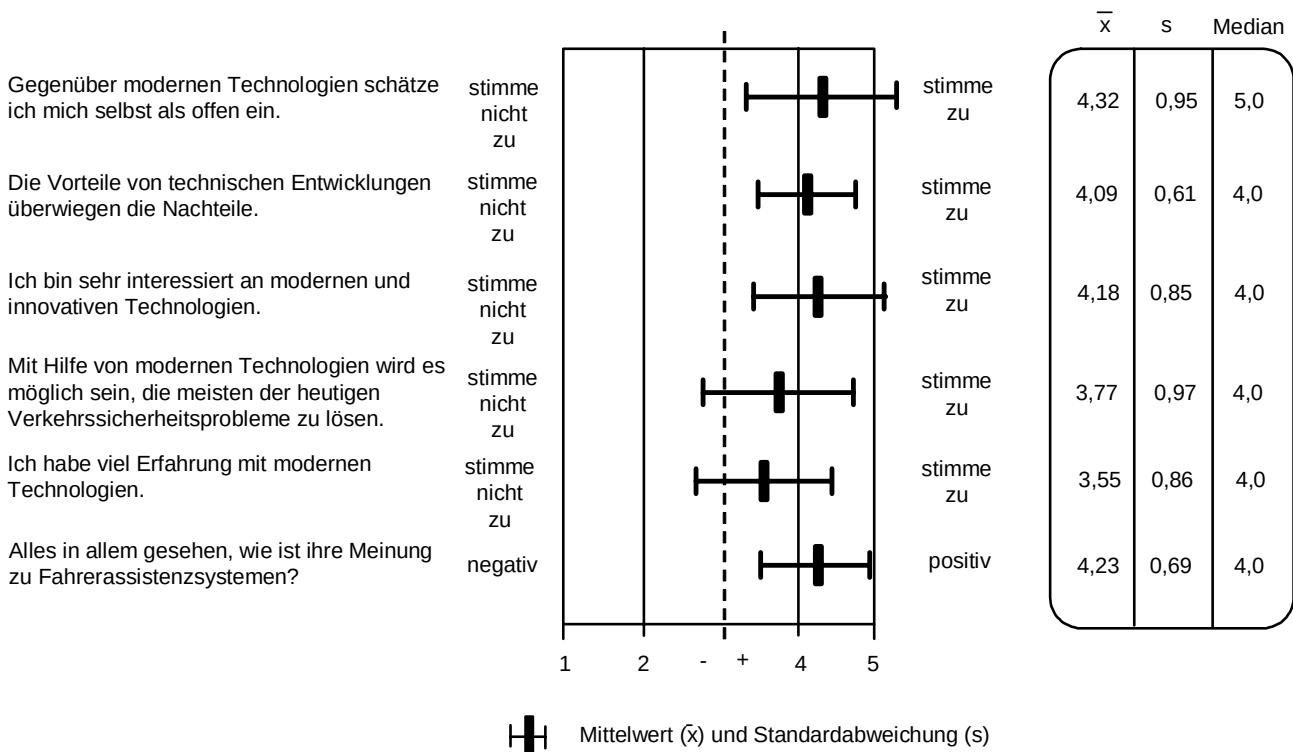


Bild 73: Ergebnisse zur Einstellung der Versuchspersonen gegenüber neuartiger Technologie

Bild 73 zeigt die Ergebnisse der Befragung hinsichtlich der Einstellung und Gesinnung der Versuchspersonen in Bezug auf neue Technologien. Grundsätzlich halten sich die Befragten für sehr offen gegenüber modernen Technologien und schätzen die Vorteile und das Potential technischer Entwicklungen sehr optimistisch ein. So glaubt keiner der 22 Befragten, dass die Nachteile technischer Entwicklungen die Vorteile überwiegen, nur einer behauptet von sich, eher nicht an modernen und innovativen Technologien interessiert zu sein. Auch an die Möglichkeiten moderner Technik zur Steigerung der Verkehrssicherheit glauben 17 Probanden (=77%), einer ist unentschlossen und 4 (=18%) widersprechen dieser Ansicht. Die Versuchsteilnehmer weisen zwar eine breite Erfahrung im Umgang mit Navigationssystemen auf (nur zwei haben keinerlei Erfahrung), im Umgang mit Fahrerassistenzsystemen, die beispielsweise wie das ACC tatsächlich auch in den Fahrvorgang eingreifen, weisen nur 4 der Versuchsteilnehmer (=18%) Erfahrungen auf. Trotz der damit mangelnden, möglicherweise meinungsbildenden Vorerfahrung ist die Meinung zu Fahrer-

assistenzsystemen positiv. Keiner der Probanden äußert sich negativ, nur 3 Probanden haben ihren Angaben entsprechend eine neutrale Einstellung. Die restlichen 19 Personen (=86%) stehen Fahrerassistenzsystemen „eher positiv“ oder „vollkommen positiv“ gegenüber. Es ergeben sich hier keine signifikanten Unterschiede zwischen Viel- und Normalfahrern.

Fahrerassistenzsysteme werden aller Voraussicht nach bei den meisten Fahrzeugherstellern erst in den gehobenen Baureihen eingeführt, bevor sie dann nach einiger Zeit auch in den kleineren Baureihen erhältlich sind. Die Fahrer und Fahrerinnen von Fahrzeugen der Oberklasse oder der gehobenen Mittelklasse sind im Durchschnitt meist älter als die Fahrergruppen kleinerer Fahrzeugklassen. Wenn nun das Alter direkt mit einer negativen Grundhaltung zu moderner Technik und Fahrerassistenz korrelieren würde, wären Probleme beim Absatz von Assistenzsystemen zu erwarten. In der vorliegenden Befragung finden sich für diesen Zusammenhang allerdings keine Hinweise. Die Versuchsteilnehmer, Repräsentanten für Fahrer der Oberklasse und der gehobenen Mittelklasse, stehen den Fahrerassistenzsystemen, wie beschrieben, offen gegenüber. Eine andere als die Top Down-Strategie zur Markteinführung derartiger Systeme (Einführung der Assistenzsysteme als Sonderausstattung in den gehobenen Baureihen, danach Systemverbreitung auch in andere Fahrzeugsegmente) aus Gründen möglicher bestehender Technologiefurchung muss also nicht zwangsläufig erwogen werden.

7.6.2 Wahrnehmbarkeit und Signalgestaltung

Die Wahrnehmbarkeit der gelben, unterbrechungslosen wie auch der rot-blinkenden Signale im linken Außenspiegel ist nach Meinung der Probanden mit einem Medianwert von 5,0 sehr gut wahrnehmbar ($x=4,4^{81}$; $s=0,9$). Die Anzeige im rechten Außenspiegel wird im Median als gut wahrnehmbar ($x=3,5$; $s=1,1$) beurteilt. Damit sind die Signale im rechten Außenspiegel allerdings als höchst signifikant schlechter ($p=0,01$) wahrzunehmen als die im linken Spiegel. Dies ist ein plausibles Ergebnis, da sowohl die weitere Entfernung als auch der größere Blickwinkel für eine leichtere Wahrnehmbarkeit der Anzeigen im linken Außenspiegel sprechen. Die Helligkeit der linken gelben und roten Anzeige liegt in einem Bereich, der von den Befragten als genau richtig beschrieben wird. Die Signale im rechten Außenspiegel könnten trotz eines optimalen Medianwertes nach Meinung der Probanden etwas heller sein ($x_{\text{rechts, gelb}}=3,6^{82}$; $s=0,9$; $x_{\text{rechts, rot}}=3,6$; $s=0,7$). Die Vibration des Lenkrades wird als sehr gut wahrnehmbar beurteilt ($x=4,8^{81}$; $s=0,4$). Auch die Frage nach der Stärke der Vibration zeigt die optimale Abstimmung des Signals ($x=3,0^{83}$; $s=0,6$). Als alternative Möglichkeit zur Anzeige der Gefährdung durch ein unbeabsichtigtes Spurverlassen

⁸¹ auf einer Skala von 1 bis 5 entspricht 1 = „sehr schlecht wahrnehmbar“, 2 = „schlecht wahrnehmbar“, 3 = „weder noch“, 4 = „gut wahrnehmbar“, 5 = „sehr gut wahrnehmbar“

⁸² auf einer Skala von 1 bis 5 entspricht 1 = „deutlich weniger hell“, 2 = „etwas weniger hell“, 3 = „genau richtig“, 4 = „etwas heller“, 5 = „deutlich heller“

⁸³ auf einer Skala von 1 bis 5 entspricht 1 = „viel zu stark“, 2 = „etwas zu stark“, 3 = „genau richtig“, 4 = „etwas zu schwach“, 5 = „viel zu schwach“

werden im Rahmen dieses Versuchs Lenkmomente untersucht. Diese werden analog zur Vibration als sehr gut wahrnehmbar beschrieben ($x=4,2^{81}$; $s=1,1$). Die Stärke des Lenkmomentes liegt zudem genau richtig ($x=3,3^{83}$; $s=0,8$). Die Ergebnisse zur Wahrnehmbarkeit der verschiedenen Systemsignale sind in Bild 74 vergleichend dargestellt.

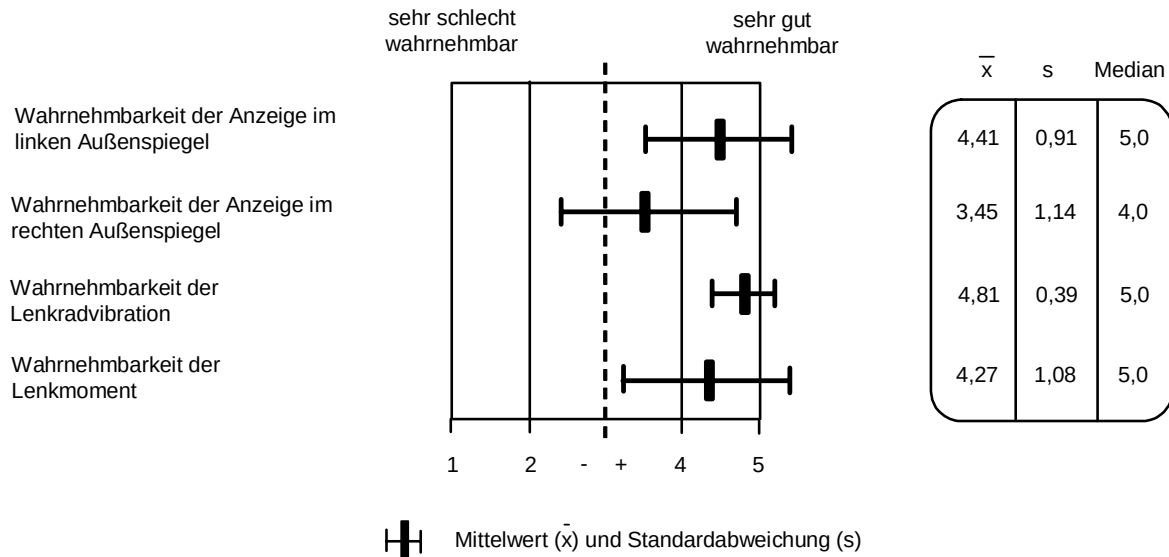


Bild 74: Ergebnisse zur Wahrnehmbarkeit der Systemsignale des Querführungsassistenten

7.6.3 Bewertung der Mensch-Maschine-Schnittstellen

Die Signale im Außenspiegel erreichen überzeugende Werte in Bezug auf ihre Wahrnehmbarkeit und Signalgestaltung. Den Fahrern wurde dabei eine Systemlösung präsentiert, in denen das gelbe Dauersignal als Informationsstufe Fahrzeuge auf der Nachbarspur anzeigen soll, auch wenn der Fahrer eine eventuelle Spurwechselabsicht noch nicht mit der Betätigung des Blinkers angezeigt hat. Auf die Frage, inwieweit die Versuchsteilnehmer dieses Signal als geeignet für diesen Zweck halten, zeigt sich ein hohes Maß an positiver Zustimmung (Median=5,0⁸⁴; $x=4,4$; $s=0,9$). In Situationen mit hoher Verkehrsdichte kann die gelbe Informationsanzeige durchaus sehr oft als ein Signal zur Anzeige von Fahrzeugen auf Nachbarspuren aktiviert sein. Es stellt sich nun die Frage, ob dieses auf die Fahrer störend wirkt, da in solchen Situationen nicht zwangsläufig eine Spurwechselabsicht des Fahrers vorliegen muss. Bereits bei der thematischen Behandlung der Spurwechselerkennung wurde in dieser Arbeit auf jenen Sachverhalt eingegangen. Die Befragung zeigt, dass die Fahrer keinerlei Störung empfinden, auch wenn Situationen vorliegen, in welchen die gelbe Informationsanzeige ständig aktiv ist (Median=5⁸⁵, $x=4,1$; $s=1,1$). Auf die Frage, ob dieses Verhalten der gelben Informationsstufe als ablenkend vom Verkehrs-

⁸⁴ auf einer Skala von 1 bis 6 entspricht 1 = „überhaupt nicht geeignet“, 2 = „weniger geeignet“, 3 = „teils teils“, 4 = „geeignet“, 5 = „sehr gut geeignet“

⁸⁵ auf einer Skala von 1 bis 5 entspricht 1 = „stört sehr“, 2 = „stört“, 3 = „stört teils teils“, 4 = „stört kaum“, 5 = „stört überhaupt nicht“

geschehen empfunden wird, zeigt die Auswertung, dass die Anzeige als kaum ablenkend empfunden wird ($x=4,2^{86}$; $s=1,0$). Die rot blinkende Warnanzeige ersetzt dann die gelbe Informationsanzeige, wenn der Fahrer einen Spurwechsel mit dem Blinker anzeigt und sich ein fremdes Fahrzeug und damit ein möglicher Kollisionspartner auf der Zielspur befindet. Diese Systemauslegung wird als sehr gut geeignet bewertet (Median= $5,0^{84}$; $x=4,5$; $s=1,0$). Werden die Eindrücke und Erfahrungen der Versuchsteilnehmer zusammengekommen, so erhalten die Signale im Außenspiegel eine durchschnittliche Schulnote von $1,8^{87}$ ($s=0,8$). Eine verbesserte Anpassung der Signalintensität an die verschiedenen Umgebungshelligkeiten wird von einigen Probanden als mögliches Verbesserungspotential benannt.

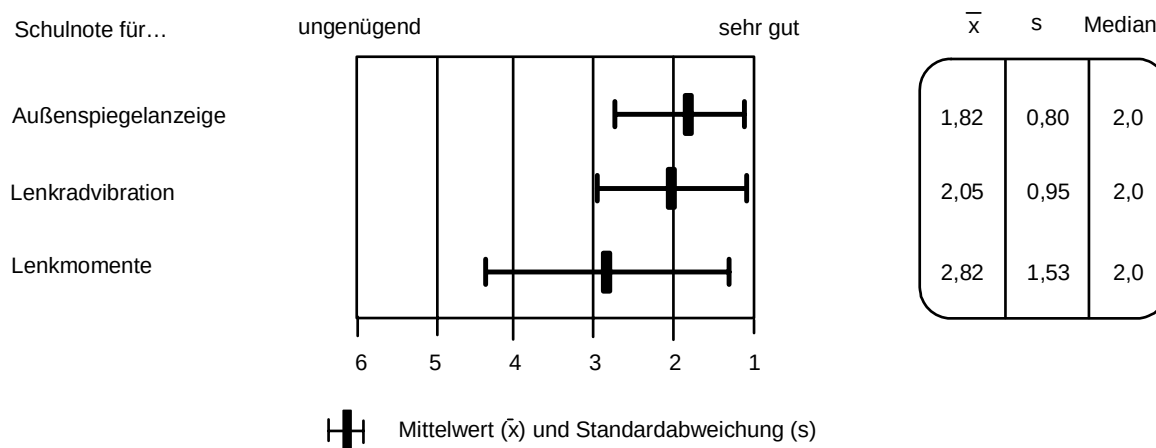


Bild 75: Bewertung der Signalarten der Mensch-Maschine-Schnittstelle

Die Warnung vor einem unbeabsichtigten Spurverlassen kann über eine Lenkradvibration oder über ein Lenkmoment erfolgen. Die Lenkradvibration schneidet in diesem Versuch in einigen Bewertungskategorien signifikant besser ab. Beispielsweise empfinden die Probanden die Lenkradvibration mit einem Medianwert von 5 als „überhaupt nicht ablenkend“ ($x=4,6^{86}$; $s=0,6$). Die Lenkmomente ihrerseits sind immer noch kaum ablenkend ($x=3,7$; $s=1,6$), damit aber signifikant ablenkender als die Lenkradvibration ($p=0,016$). Da die Warnung vor einem unbeabsichtigten Spurverlassen auch immer dann an den Fahrer weitergegeben wird, wenn das Fahrzeug die eigene Fahrspur verlässt und der Fahrer den Blinker nicht gesetzt hat, kann es dann (in den Augen der Bediener) zu Falschinterpretationen kommen, wenn der Fahrer absichtlich die Spur wechseln will, den Blinker aber nicht gesetzt hat. In genau diesen Situationen, in denen der Fahrer beim Spurwechsel bewusst den Blinker nicht setzt, stört das Lenkmoment im Vergleich mit der Lenkradvibration die Fahrer signifikant mehr. ($x_{\text{Lenkradvibration}}=2,1^{85}$; $s=1,2$; $x_{\text{Lenkmoment}}=2,8$; $s=1,5$; $p=0,032$). Interessant ist in diesem Zusammenhang, dass sich in diesen Situationen die weiblichen Pro-

⁸⁶ auf einer Skala von 1 bis 5 entspricht 1 = „stark ablenkend“, 2 = „ablenkend“, 3 = „teils teils“, 4 = „kaum ablenkend“, 5 = „überhaupt nicht ablenkend“

⁸⁷ auf einer Skala von 1 bis 6 entspricht, 6 = „ungenügend“, 5 = „mangelhaft“, 4 = „ausreichend“, 3 = „befriedigend“, 2 = „gut“, 1 = „sehr gut“

banden von einem Lenkmoment signifikant weniger gestört fühlen als die männlichen ($p=0,041$). Auf die Frage, ob die Lenkradvibration insgesamt zur Warnung vor einem Verlassen der Fahrspur geeignet erscheint, ergibt sich ein Mittelwert von $x=4,2^{84}$ ($s=0,9$). Bei den Lenkmomenten ist es ein Wert von $x=3,3$ ($s=1,6$). Die Lenkmomente sind demnach nach Meinung der Versuchsteilnehmer im Durchschnitt als Spurverlassenswarnung nur „teils teils“ geeignet und schneiden damit signifikant schlechter ab als die Lenkradvibration ($p=0,032$).

Die Versuchspersonen wurden auch dazu befragt, ob es möglich scheint, über das Lenkmoment eine Warnung beim absichtlichen Spurwechsel auszugeben. Das Ergebnis zeigt einen Mittelwert von $3,5^{84}$ ($s=1,6$), was auf den ersten Blick im Vergleich zu den vorstehend vorgestellten Ergebnissen zur Eignung der optischen Außenspiegelanzeige nicht bestehen kann. Wiederum im Gesamten beurteilt, geben die Befragten der Lenkradvibration die durchschnittliche Schulnote von $2,1$ ($s=0,9$). Die Lenkmomente insgesamt erreichen im Mittel die Schulnote „befriedigend“ ($x=2,8$; $s=1,5$).

7.6.4 Auswahl der Systemfunktionalität

Auf die Frage, welche Warnung sie bei einem unbeabsichtigten Spurverlassen bevorzugen, ergibt sich die in Bild 76 dargestellte Präferenz.

Welche Warnung bevorzugen Sie bei einem unbeabsichtigten Spurverlassen?

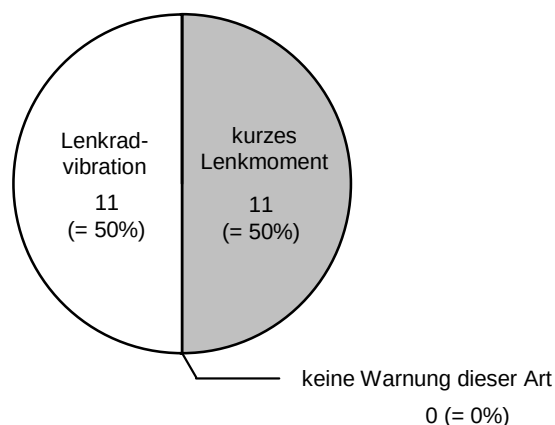


Bild 76: Ergebnisse zur Signalpräferenz zur Unterstützung beim Spurhalten

Obwohl in den meisten der vorangehenden Fragestellungen (beispielsweise zu Ablenkung und zur generellen Eignung) die Lenkradvibration mit zum Teil signifikant besseren Werten als das Lenkmoment abschnitt, scheint nun wenigstens die Hälfte der Befragte das Lenkmoment zur Spurverlassenswarnung zu bevorzugen. Ein möglicher Grund kann sein, dass zwar die Lenkradvibration als Signal größeren Anklang findet, die Befragten aber den Lenkmomenten einen größeren Effekt auf die Sicherheit zutrauen und diese dann als Warnung deshalb im Gesamtsystem bevorzugen.

Rückt die Spurwechselunterstützung wieder in den Blinkpunkt, so zeigt sich, dass die Mehrzahl der Befragten (=64%) zusätzlich zur Warnstufe auch eine Informationsstufe wünscht. Der Anteil der Personen, denen eine Warnstufe ausreicht, beläuft sich auf 32%, nur ein Befragter wünscht sich ausschließlich die Informationsstufe (siehe Bild 77).

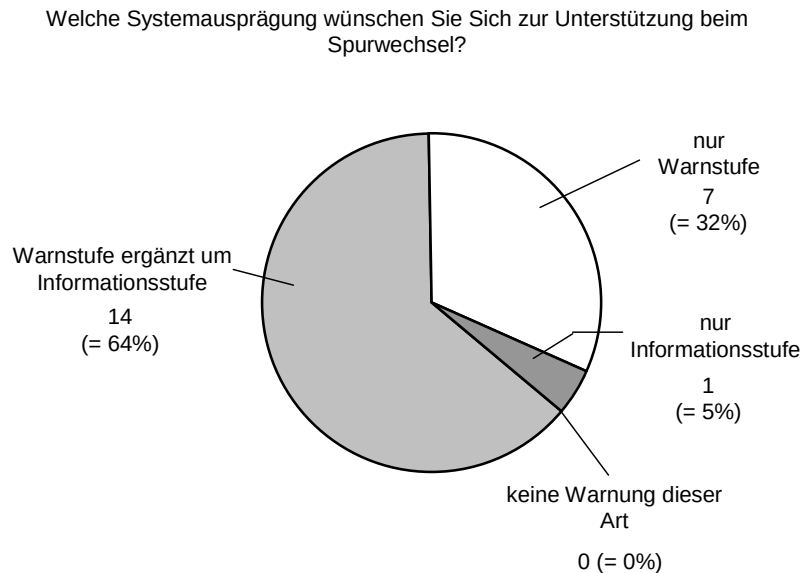


Bild 77: Ergebnisse zur Signalpräferenz zur Unterstützung beim Spurwechsel über Außenspiegelanzeige

Auf die Frage, ob eine Unterstützung des Spurwechsels über die optischen Außenspiegelanzeigen nur nach links ausreichen würde, zeigt sich, dass ein Großteil der Befragten (17 von 22 Personen=77%) eine beidseitige Unterstützung favorisieren würde. Nur 5 Versuchsteilnehmer (=23%) können sich mit einer Lösung zufrieden geben, die Fahrzeuge ausschließlich auf der linken Nachbarspur anzeigt.

Grundsätzlich bietet der hohe Integrationsgrad des Querführungsassistenten die Möglichkeit, das Signal der Außenspiegelanzeige mit einem haptischen Signal zu kombinieren, um damit eventuell die Wahrnehmbarkeit und die Reaktionszeit auf die Signaldarbietung zu verbessern. Deshalb wurden die Versuchsteilnehmer auch dazu befragt, wie sie beim Spurwechsel gewarnt werden möchten, wenn sie die verschiedenen Signaltypen frei zu einer Lösung kombinieren könnten. Bild 78 zeigt das Ergebnis. In diesem Zusammenhang ist interessant, dass sich ein Großteil der Probanden eine Lösung zur Spurwechselassistenten wünscht, bei der die Außenspiegelanzeige um ein kurzes korrigierendes Lenkmoment ergänzt würde.

Welche Warnung wünschen Sie sich zur Unterstützung beim Spurwechsel?

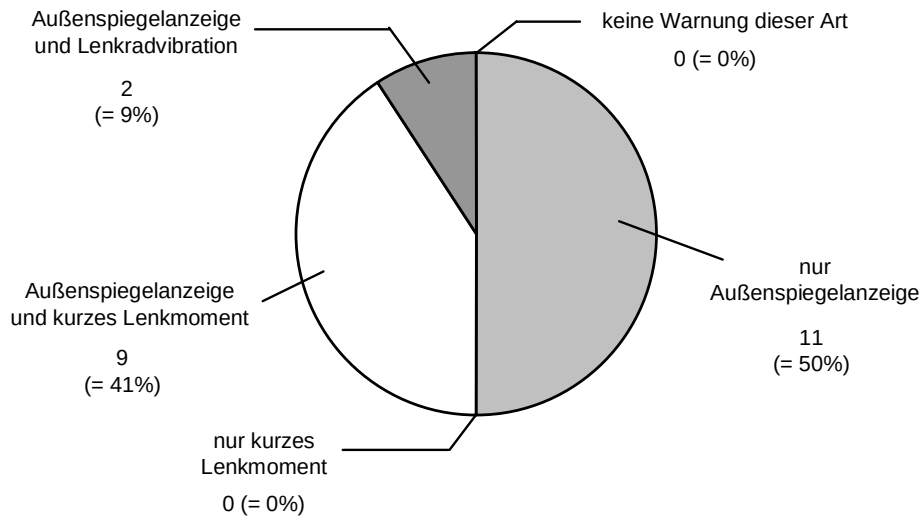


Bild 78: Präferenz zur Unterstützung beim Spurwechsel

7.6.5 Rechtzeitigkeit und Rechtmäßigkeit

Die statistische Auswertung der Daten zeigt, dass die Systemreaktionen als rechtmäßig und rechtzeitig bezeichnet werden können (siehe Bild 79). Das System gilt mit einem Medianwert von 4 als „gut vorhersehbar“ ($x=4,0^{88}$; $s=0,8$). Die Einschätzungen der Probanden zum Gefährdungsgrad bestimmter Fahrmanöver und -situationen stimmen meistens mit den Einschätzungen des Systems überein (Median= 4^{89} ; $x=3,9$; $s=0,8$). Bei der Spurwechselunterstützung über die Außenspiegelanzeigen ist der Zeitpunkt der Warnaktivierung vor einem herannahenden Fahrzeug auf der Nachbarspur mit einem Medianwert von 3^{90} genau richtig ($x=2,9$; $s=0,6$). Die Signale der Informations- wie der Warnstufe im Außenspiegel werden noch so lange aufrechterhalten, bis das Fremdfahrzeug auf der Nachbarspur das eigene Fahrzeug fast vollständig überholt hat. Dieses Nachwarnen könnte nach Meinung der Versuchsteilnehmer etwas kürzer ausfallen, wenn man den berechneten Mittelwert von $x=2,7$, der sich an der Grenze zwischen den Bewertungskategorien „genau richtig“ und „etwas zu spät“ befindet, als Grundlage für diese Behauptung heranzieht. Auf die Frage, ob denn die Reaktionen des Systems insgesamt akzeptabel erscheinen und damit Rechtmäßigkeit und Rechtzeitigkeit sichergestellt sind, ergibt sich ein sehr guter Mittelwert von $4,2^{91}$ ($s=1,0$), der damit ein deutlich akzeptables Systemverhalten verdeutlicht.

⁸⁸ auf einer Skala von 1 bis 5 entspricht 1 = „sehr schlecht vorhersehbar“, 5 = „sehr gut vorhersehbar“

⁸⁹ auf einer Skala von 1 bis 5 entspricht 1 = „stimmten nicht überein“, 5 = „stimmten immer überein“

⁹⁰ auf einer Skala von 1 bis 5 entspricht 1 = „viel zu spät“, 5 = „viel zu früh“

⁹¹ auf einer Skala von 1 bis 5 entspricht 1 = „unakzeptabel“, 5 = „voll akzeptabel“

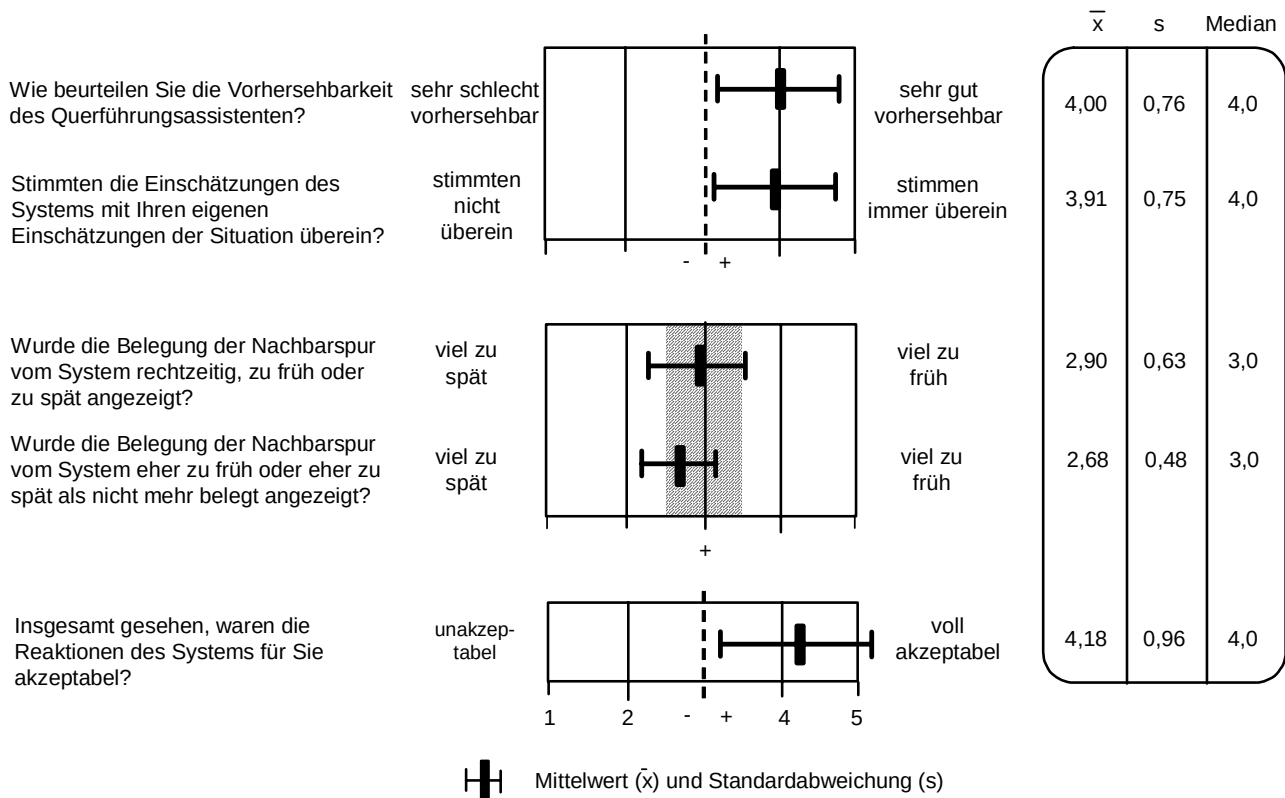


Bild 79: Ergebnisse zur Rechtmäßigkeit und Rechtzeitigkeit der Systemreaktionen des Querführungsassistenten

7.6.6 Gebrauchssicherheit

Jedes technische System hat unbestreitbar seine Grenzen. Diese können absichtlich vom Systementwickler gesetzt werden, wenn er die Funktionalität definiert. Dies kann beispielsweise der Fall sein, wenn die Unfalldatenanalyse kein Unfallpotential in Stadtsituationen vorhersieht, und der Entwickler deshalb die Systemaktivierung erst bei höheren Geschwindigkeiten zulässt. Dem Bediener muss dann aber klar sein oder klar gemacht werden, in welchen Situationen er eine Unterstützung durch das System erwarten kann. Auf der anderen Seite ergeben sich Grenzen auch ungewollt dadurch, dass die eingesetzten, technischen Bauteile leistungslimitierenden Faktoren unterworfen sind. Beispielsweise weist jede Sensorikkomponente technologiebedingte Nachteile auf. Videobasierte Systeme beispielsweise zeigen deutliche Leistungseinbrüche bei widrigen Sichtbedingungen. Hier gilt es, die Systemgrenzen und den Systemstatus offen, transparent und nachvollziehbar zu machen und so dem Bediener des Systems zu ermöglichen, immer über die Leistungsfähigkeit und den Aktivierungsstatus seines Fahrerassistenzsystems informiert zu sein. All diese Ansätze lassen sich unter dem Aspekt der Gebrauchssicherheit zusammenfassen.

Die Multimediabefragung aus Kapitel 3 zeigt, dass ohne Fahrerfahrung mit einem Fahrerassistenzsystem nicht immer klar sein muss, welches Systemziel es verfolgt. Will es den Komfort des Fahrers erhöhen oder dient es vor allem der Erhöhung der Sicherheit? Das

Bild, das sich im Rahmen dieses Fahrversuches für den Querführungsassistenten ergibt, ist folgendes: 15 der Versuchspersonen sehen das wesentliche Argument, das sie zum Kauf des Querführungsassistenten bewegen könnte, in der Erhöhung der Sicherheit. 2 Probanden in der Erhöhung des Fahrkomforts und 5 erwarten eine Komfort- wie Sicherheitssteigerung gleichermaßen. Das Systemziel, die Erhöhung der Sicherheit, ist demnach der absoluten Mehrheit der Befragten nach einer ausgedehnten Erfahrungsphase mit dem System klar.

Im Rahmen des Fahrversuches tauchen zwangsläufig auch Situationen auf, in denen das System inaktiv ist, weil bestimmte Systemgrenzen überschritten wurden. Es stellt sich hier die Frage, ob der Fahrer diese Bedingungen akzeptiert oder ob für ihn verschiedene technologiebedingte Systemgrenzen nicht akzeptabel sind. Die Befragung zeigt beispielsweise, dass 9 Versuchsteilnehmer (=41%) akzeptabel oder eher akzeptabel finden, dass das System nur bei guter Sicht funktioniert, nicht aber bei Nebel, sehr starkem Regen oder Schnee. Die Mehrheit von 13 Probanden (=59%) kann diese Systemgrenze eher nicht oder gar nicht akzeptieren. Eine fast unmögliche Forderung, da annähernd jede der am Markt verfügbaren und für ein Assistenzsystem zur Verfügung stehenden Sensortechnologien eine witterungsabhängige Leistungsfähigkeit aufweist.

Im Spurwechselfall ist die Erkennung auffahrender Fahrzeuge von der Reichweite des Radars abhängig. Wäre die Erkennung auf einen vorher festgelegten und fest definierten Bereich bis 40 m hinter dem Fahrzeug begrenzt, würden das 16 Befragte (=73%) akzeptieren, 6 (=27%) eher nicht oder nicht. Unterstützt das System den Fahrer nur bei Geschwindigkeiten, die höher als 70 km/h sind, akzeptieren das 17 der Probanden (=77%). Kann das System den Fahrer nur bei vorhandenen eindeutigen und unverschmutzten Fahrbahnmarkierungen (z.B. nicht innerhalb von Baustellen) bedienen, halten das 12 Probanden für akzeptabel (=55%), 10 Probanden (=45%) möchten diese Systemgrenze nicht akzeptieren müssen.

Das System kann ein ungewolltes Verlassen der Fahrspur von einem absichtlichen Spurwechsel nur über die Betätigung des Blinkers ausmachen. Unbeabsichtigte Warnungen bei einem Spurübertritt sind die Folge, wenn der Fahrer zwar absichtlich die Spur wechselt, den Blinker aber nicht setzt. Diese Grenze halten 14 Probanden (=64%) für akzeptabel, 6 (=27%) für eher akzeptabel und nur 2 Probanden (=9%) für eher nicht annehmbar. Für keinen der Befragten ist dieser Systemübergang absolut unakzeptabel. Die Befragung offenbart damit eine große Herausforderung. Aufgrund der Sensorik ergeben sich nun mal Systemgrenzen (z.B. Einschränkungen der Videosensorik bei widrigen Wetterbedingungen), die in absehbarer Zeit nicht zufrieden stellend gelöst werden können. Diese sind aber nur teilweise für die potentiellen Kunden akzeptabel. Es scheint, als ob funktionsbedingte und/oder quantifizierbare Systemgrenzen wie eine Geschwindigkeitsschwelle oder ein Erkennungsbereich eher akzeptiert werden, als wenig deterministische Situationsbeschreibungen wie schlechte Sicht oder Witterungsbedingungen. Eventuell kann hier dar-

über nachgedacht werden, exakt zu beschreibende und nachvollziehbare Systemgrenzen einzuführen (z.B. System ist inaktiv, wenn der Regensensor aktiviert ist).

Fehldetektionen, die zu einer überzähligen Warnung führen oder auch Situationen, in denen eine notwendige Warnung unterbleibt, sind jederzeit möglich. Welche Einschätzung potentielle Kunden in diesem Fall treffen, ist Gegenstand des folgenden Fragekomplexes. Als Beispiel wurde eine Situation geschildert, in der der Fahrer beispielsweise eine Vibration am Lenkrad erhält, obwohl er sich einwandfrei in der Fahrspur befindet oder er eine Warnung erhält, obwohl beim Spurwechsel die Zielspur frei ist. Infolgedessen geschieht ein Unfall.

Die Ergebnisse zeigen, dass es einen Unterschied gibt, ob die Befragten beurteilen sollen, wer den Schuldigen bei einer fehlenden wie bei einer überzähligen Warnung nach rechtlichen Regelungen darstellt und wer den Schuldigen nach ihrer persönlichen Meinung darstellt (siehe Bild 80 und Bild 81). Der Grundsatz, dass der Fahrzeugführer für alles verantwortlich ist, scheint tief verwurzelt. Ein absoluter Großteil glaubt, dass nach geltendem Recht der Fahrzeugführer voll in der Verantwortung verbleibt, auch wenn das System nicht ordnungsgemäß funktioniert. Nach ihrer persönlichen Meinung befragt, korrigieren die Befragten dieses Ergebnis und geben an, dass eine Teilschuld dem Fahrzeugführer, als auch dem Hersteller anzuhaften ist. Die Ergebnisse der Befragung zeigen aber ebenso, dass die Verantwortlichkeit im Falle eines Unfalls für eine Kaufentscheidung für oder gegen das Assistenzsystem kaum eine Rolle spielt. 16 der 22 Probanden (=73%) geben an, dass die Schuldfrage im Falle eines Unfalls nicht kaufentscheidend für sie ist. Die restlichen 6 Befragten erwarten ein System, das einwandfrei funktioniert, systeminduzierte Gefahren- oder Unfallsituationen also per se ausschließt.

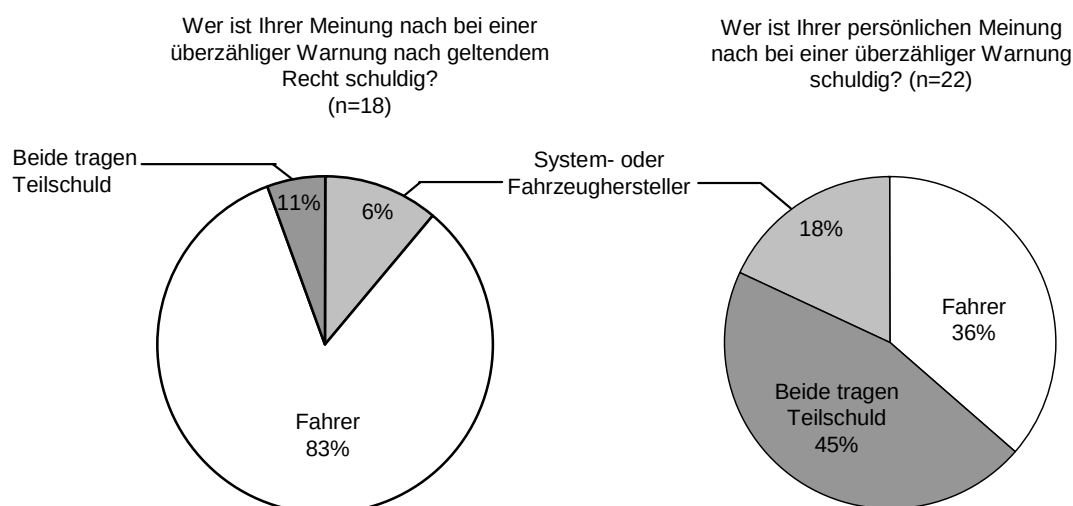


Bild 80: Ergebnisse zur Schuldfrage im Falle einer überzähligen Warnung nach geltendem Recht und nach persönlicher Meinung der Befragten

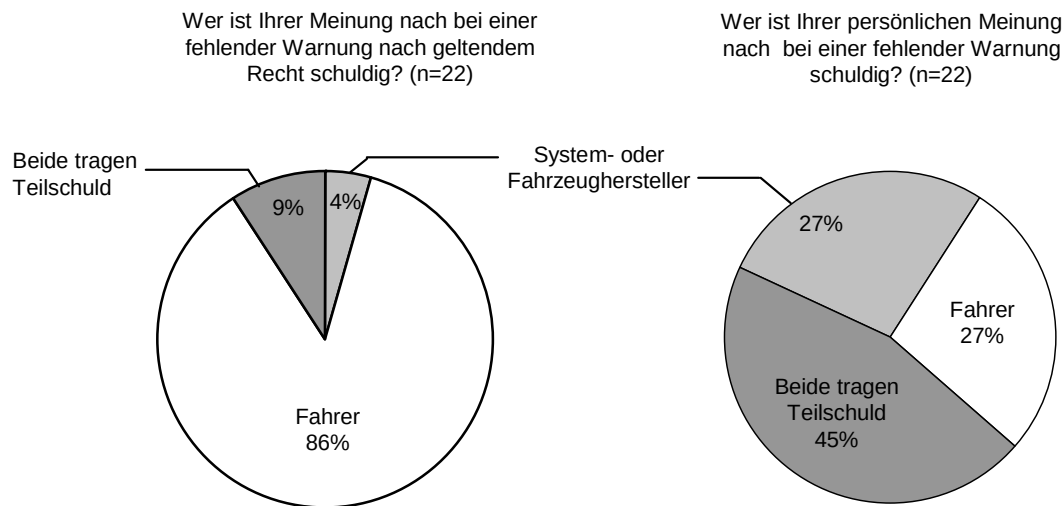


Bild 81: Ergebnisse zur Schuldfrage im Falle einer fehlenden Warnung nach geltendem Recht und nach persönlicher Meinung der Befragten

Abschließend wurden die Versuchsteilnehmer befragt, inwieweit sie verschiedenen Aussagen aus dem Themenkomplex der Gebrauchssicherheit zustimmen. Das Ergebnis zeigt Bild 82. Besonders der kooperative Aspekt des Assistenzsystems wird hervorgehoben. So glaubt eine Mehrheit der Fahrer, dass in kritischen Situationen die Unterstützung des Systems hilfreich wäre. Auf der anderen Seite sind die Bediener sich im Klaren darüber, nicht blind die Verantwortung an das System zu übergeben, sondern konstatieren, dass die Unterstützung des Systems nicht dazu führen darf, dass der Fahrer sich anderen, zweitrangigen Aufgaben zuwendet. Aber auch negative Auswirkungen werden befürchtet. So glauben einige, dass andere Systembenutzer nicht ganz so aufgeklärt und verantwortungsbewusst damit umgehen würden und das System dazu benutzen könnten, unkomfortable Dinge wie den Sicherheitsblick über Außenspiegel und Schulter einzusparen.

Das Thema Gebrauchssicherheit schließt schlussendlich auch mit ein, wie sich Systemaktivierung und Systemdeaktivierung gestalten. Bereits im Rahmen der Multimediabefragung wurde darauf eingegangen. Die Ergebnisse, die dort gewonnen werden konnten, werden durch die Ergebnisse dieses Fahrversuchs bestätigt. Demnach wünschen sich 15 Versuchsteilnehmer (=68%), dass sich das System sich immer selbstständig einschaltet, jederzeit aber durch einen Tastendruck ausgeschaltet werden kann. 5 (=23%) bevorzugen, dass das System ausschließlich von ihnen durch einen Tastendruck aktiviert und deaktiviert werden kann. Nur 2 (=9%) der 22 Personen möchten, dass das System sich selbstständig einschaltet und danach auch immer aktiv bleibt, ohne manuell deaktiviert werden zu können.

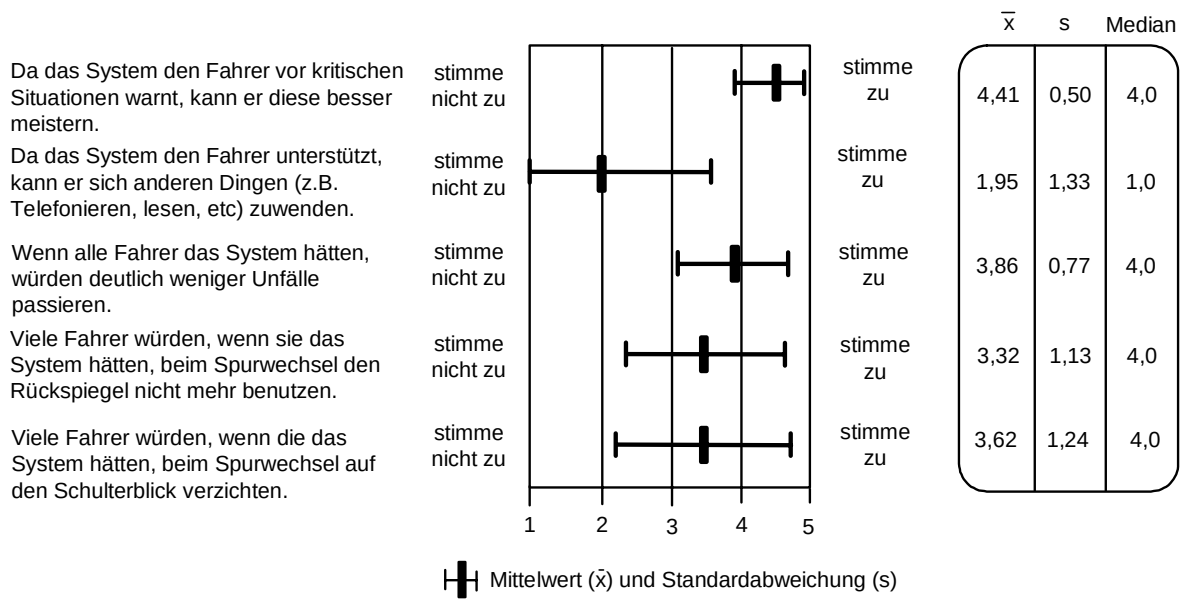


Bild 82: Ergebnisse zur Gebrauchssicherheit

7.6.7 Bewertung des Gesamtsystems

Abschließend wurden die Versuchsteilnehmer nach ihrer generellen Meinung zum bis dahin in rund 2 Stunden erfahrenen Querführungsassistenten befragt. Bild 83 verdeutlicht das Ergebnis⁹². Der Querführungsassistent wird als nützliches Assistenzsystem eingestuft, das die Verkehrssicherheit erhöht, sich dabei aber als entspannend, kontrollierbar und unterstützend darstellt. Das System erreicht nur eine durchschnittliche Bewertung hinsichtlich ihres Reifegrades, was aber keine Überraschung darstellt, da jedem der Probanden klar war, dass es sich um einen Versuchsträger und um ein System im Entwicklungsstadium handelte. Diese Tatsache schlägt sich damit natürlich auch in der subjektiven Bewertung nieder.

⁹² auf einer Skala von 1 bis 5 entspricht der Wert 1 der jeweils schlechtesten Bewertung und der Wert 5 der jeweils besten Bewertung

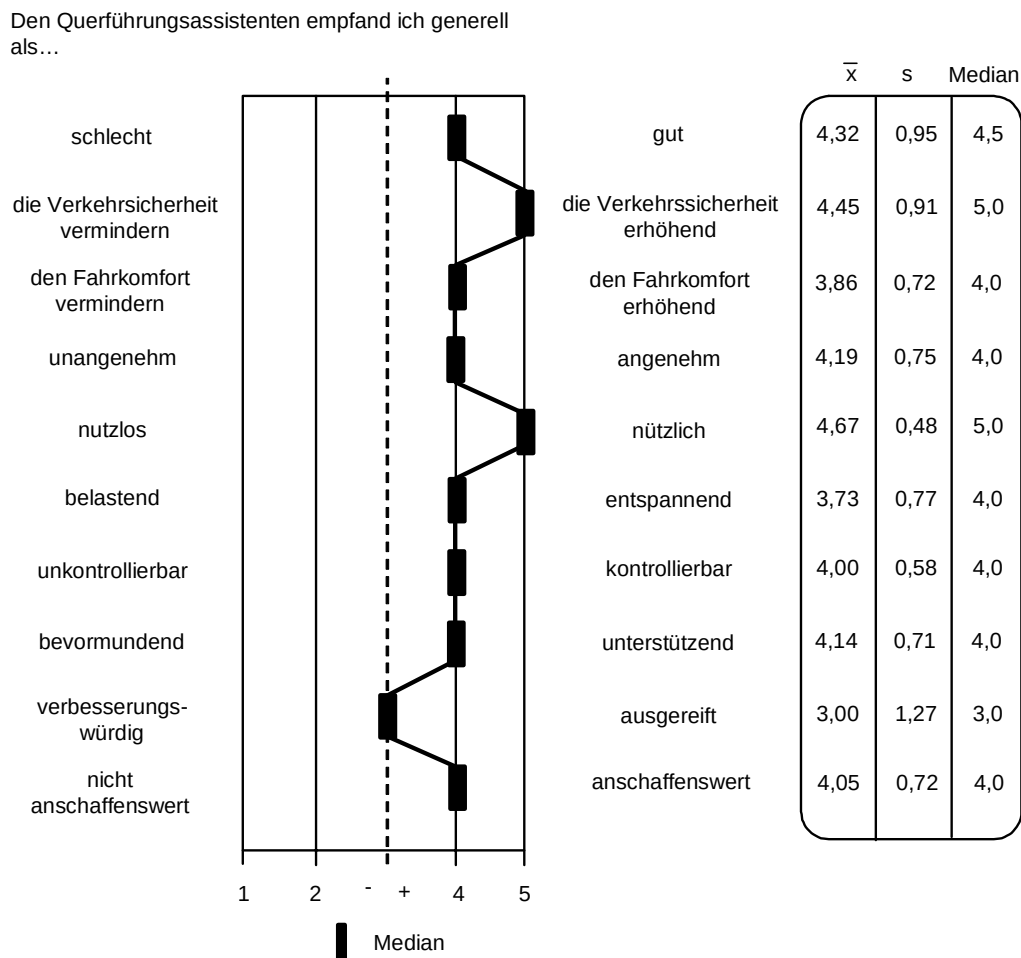


Bild 83: Ergebnisse zur generelle Bewertung des Querführungsassistenten im Rahmen des Fahrversuchs

Auch die Ergebnisse zur Frage, ob die Versuchsteilnehmer sich beim Kauf eines neuen Fahrzeuges den Querführungsassistenten als Sonderausstattung hinzukaufen würden, kann als Folge des sehr guten Eindrucks, den die 22 Versuchsteilnehmer von dem System erlangen konnten, gewertet werden. So geben 20 an (=91%), dass sie das System bestimmt oder vielleicht kaufen würden, nur 2 der Probanden schließen einen Kauf als Sonderausstattung kategorisch aus. Um herauszufinden, bei welchem Preis der Querführungsassistent am Markt bestehen könnte, wurde analog zu den im Rahmen der Multimediabefragung dargestellten Ergebnissen ein Price Sensitivity Measurement durchgeführt. Diesmal jedoch mussten die Probanden das System nicht nur aus Beschreibungen bewerten, sondern konnten ihre Erfahrungen aus der vorangehenden Versuchsfahrt zu Rate ziehen. Diese Tatsache schlägt sich logischerweise in einer deutlich höheren Preisbereitschaft nieder. Systeme dieser Komplexität können nur wirklich Nachfrage generieren, wenn sie „erfahren“ werden, eine Darstellung auf Papier oder im Stand reicht nicht aus, um die Begeisterung der Kunden zu wecken. Wie Bild 84 zeigt, bewegt sich nun der optimale Preisbereich zwischen einem Wert von 500 und 1.000 Euro.

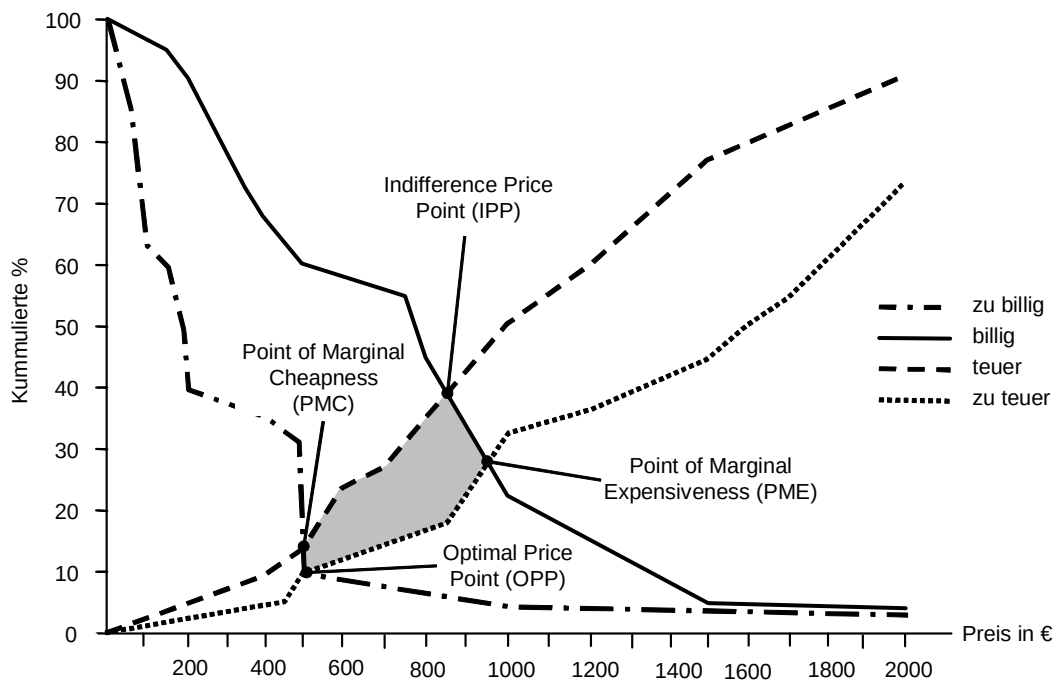


Bild 84: Price Sensitivity Measurement des Querführungsassistenten im Rahmen des Fahrversuches

Allerdings ist die Spannbreite der in diesem Versuch genannten Werte extrem. Ein Proband hielt einen Preis von 4.000 EUR für so billig, dass er an der Qualität zweifeln würde, einen Preis 7.500 EUR zwar für teuer, würde das System aber trotzdem kaufen. Erst ein Preis von 9.000 EUR schien auch ihm deutlich zu teuer. Dem gegenüber steht eine Versuchsperson, die 450 EUR für zu teuer hielt. Diese enorme Spanne ist die Folge dessen, dass sich noch kein markttransparenter Preisbereich für Fahrerassistenzsysteme herausgebildet hat. Erst mit Einführung dieser Systeme auf breiter Front, kann sich auch ein Referenzpreis für diese Art von Systemen festigen.

7.7 Diskussion

Die Auswertung der Daten des Fahrversuchs zeigt folgendes: Die Wahrnehmbarkeit und die Signalgestaltung der optischen Außenspiegelanzeige, der Lenkradvibration als auch der Lenkmomente bewegt sich im oder nahe des optimalen Bereichs. Die Versuchspersonen halten alle drei Signale für „sehr gut wahrnehmbar“ (Median=5,0). Dass die Anzeige im rechten Außenspiegel in Bezug auf ihre Wahrnehmbarkeit deutlich abfällt, hat seinen Grund vermutlich im größeren Abstand zum Fahrer und im größeren Winkel zur Hauptsehachse desselben.

Beim Vergleich der drei Signalarten anhand von Schulnoten werden die optischen Signale über die Außenspiegelanzeige besser beurteilt (Note 1,8) als Lenkradvibration (2,1) und Lenkmomente (2,8). Auf die Frage nach der Signalpräferenz zur Unterstützung beim

Spurhalten votieren die Fahrer in der vorliegenden Untersuchung zwischen Lenkradvibration und Lenkmomenten nicht einheitlich, obwohl in der Einzelsignalbewertung eine eindeutige Präferenz hinsichtlich der Lenkradvibration festzustellen war. Es kann vermutet werden, dass einige der Befragten den Lenkmomenten einen größeren Effekt auf die Sicherheit zutrauen und diese dann als Warnung im Gesamtsystem bevorzugen.

Die Signale im Außenspiegel werden sehr positiv bewertet, sowohl die gelbe Informationsstufe wie auch die rot blinkende Warnstufe werden mit einem Medianwert von 5,0 hinsichtlich ihrer Eignung bedacht. Die gelbe Informationsstufe wird als nicht ablenkend empfunden, eine Kombination aus Informations- und Warnstufe wird deshalb von 64% aller Befragten bevorzugt. 32% wünschen sich ausschließlich die Warnstufe, kein Proband möchte auf die optischen Signale im Außenspiegel verzichten. Die Unterstützung soll sowohl auf der linken wie auch auf der rechten Seite erfolgen, wofür 77% der Versuchsteilnehmer votieren.

Um die Relationen zwischen den Signalmöglichkeiten besser auflösen zu können und um damit eine Lösung für das aus Spurwechsel- und Spurhalteunterstützung bestehende Gesamtsystem herauszuarbeiten, soll die in dargestellte und an die eingangs dargestellte Tabelle 36 angelehnte Kreuztabelle Tabelle 39 dienen. Sie zeigt, wie viele Probanden sich jeweils für die verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten entschieden haben. Im Vergleich der verschiedenen Funktionskombinationen QFA-1 bis QFA-4 leitet sich kein eindeutiger Favorit ab, die Meinung der Probandengruppe ist heterogen.

Tabelle 39: Kreuztabelle zur gewünschten Systemfunktionalität

		Warnung vor Gefährdung beim gewollt initiierten Spurwechsel über...*	
		Außenspiegel- anzeige	Außenspiegelanzeige & Lenkmoment
Warnung bei unbeabsichtigtem Fahrspurverlassen über...	Lenkrad- vibration	6 Befragte (Variante QFA-1)	3 Befragte (Variante QFA-3)
	Lenk- moment	5 Befragte (Variante QFA-2)	6 Befragte (Variante QFA-4)

* 2 Befragte votieren für andere Ausprägung

Zwei Lösungsansätze sind auf dieser empirischen Basis aus Sicht des Systemanbieters denkbar. Es wäre möglich, sich eine der Systemlösungen auszuwählen und ausschließlich diese umzusetzen. Aufgrund der transparenten Systemstruktur und der verständlichen Systemfunktionalität ist möglicherweise eine Gewöhnung aller Nutzer an eine feststehende Systemausprägung möglich. Die Untersuchungen in dieser Arbeit zeigen aber die aus-

geprägte Heterogenität des Meinungsbildes potentieller Kunden. Werden diese nach ihrer Präferenz hinsichtlich der Warnsignale zur Verhinderung des ungewollten Spurverlassens und der Unterstützung beim Spurwechsel befragt, kann auf empirischer Basis keine Entscheidung zwischen Lenkmomenten und Lenkradvibration getroffen werden. Um aber allen Benutzern des Systems eine passende Systemauslegung anbieten zu können, böte sich eine einstell- oder skalierbare Lösung an. Der Fahrer konfiguriert den Querführungsassistenten selbst (z.B. über ein zentrales Bedienelement) und entscheidet so, ob er sich für die Verhinderung des ungewollten Spurverlassens über eine Lenkradvibration oder ein kurzes Lenkmoment entscheidet. Zur Unterstützung beim Spurwechsel kann der Bediener die Außenspiegelanzeige optional um ein kurzes Lenkmoment ergänzen. Die Kombination aus Lenkradvibration zur Verhinderung des ungewollten Spurverlassens und Außenspiegelanzeige und kurzes Lenkmoment zur Spurwechselunterstützung („QFA-3“) kann beispielsweise mangels Zuspruch durch die Versuchsteilnehmer vernachlässigt werden.

Die Wichtigkeit rechtzeitiger und rechtmäßiger Systemaktionen wurde bereits eingehend herausgearbeitet. Die Bewertung des Gesamtsystems zeigt, dass diese Anforderungen im Querführungsassistenten zufrieden stellend umgesetzt sind. Die Systemaktionen werden auf hohem Niveau als vorhersehbar und rechtzeitig eingeschätzt. Sie stimmen demnach mit den Einschätzungen des Fahrers übereinstimmen und bewirken so ein hohes Maß an Akzeptanz. Damit ist bewiesen, dass die Ansätze zur Auslegung des Systems, wie sie in Kapitel 6.1 und 6.2 entwickelt und beschrieben wurden, die Systemfunktionalität und die ursprünglich formulierten Systemziele erfolgreich umsetzen. Der Querführungsassistent wird generell in allen Kategorien von den Versuchsteilnehmern positiv gesehen. Er scheint mit einem Medianwert von 5,0⁹² „die Fahrsicherheit erhöhend“, „nützlich“ und mit einem Medianwert von 4,0 als „gut“, „den Fahrkomfort erhöhend“, „angenehm“, „entspannend“, „kontrollierbar“, „unterstützend“ und „anschaffenswert“. Ein Price Sensitivity Measurement zeigt, dass ein Preis zwischen 500 und 1.000 Euro nach Meinung der Kunden für den Querführungsassistenten möglich ist. Deutlich wird der Unterschied zur Multimediabefragung aus Kapitel 3.2. Das Erleben der Systemfunktionalität im Versuchsträger führt zu einer 2,5-fach größeren Preisbereitschaft. Diese Erkenntnis sollte zukünftig bei der Präsentation derartiger Assistenzsysteme berücksichtigt werden. Der direkte und unbeeinflusste Umgang mit dem System im realen Fahrbetrieb ist aller Voraussicht nach nicht durch eine Erklärung anhand von Prospektmaterial oder durch einen Automobilfachverkäufer anhand eines Präsentationsfahrzeugs zu ersetzen. Nach der Versuchsfahrt würden 9 von 10 Personen den Querführungsassistenten, würde er den angeboten, „bestimmt“ oder „vielleicht“ als Sonderausstattung ordern.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die bisherigen Ausführungen zeigen, dass alle beteiligten Parteien (Automobilhersteller, Gesetzgeber, Gesellschaft) vor einer großen Herausforderung stehen, sofern sie auch in Zukunft eine nachhaltige Verbesserung der Verkehrs- und der Fahrzeugsicherheit garantieren wollen. Die ununterbrochene Steigerung des Pkw-Bestandes und die Intensivierung grenzüberschreitenden, straßenbasierten Güterverkehrs lässt die Ziele der Europäischen Union, bis 2010 eine Halbierung der Zahl der Verkehrsunfalltoten zu erreichen, fast unerreichbar erscheinen. Fahrerassistenzsysteme stehen nun schon seit einigen Jahren sehr stark im Blickpunkt wissenschaftlicher und öffentlicher Betrachtung, da ihnen die Möglichkeit zugestanden wird, die Verkehrsunfallzahlen drastisch zu senken.

In der vorliegenden Arbeit wurden Ansätze zur benutzerzentrierten Entwicklung und fahrrergerechten Auslegung eines Querführungsassistenten untersucht. Die Erhebung und Beachtung von Benutzerwünschen muss alle Entwicklungsstadien, angefangen von der Zieldefinition, konsequent begleiten. Bei der Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle, die bei der technischen Umsetzung der Systemfunktionalität eine entscheidende Rolle einnimmt, muss der Mensch mit seinen Stärken und Schwächen in den Fokus rücken.

Aktive Sicherheitssysteme werden in Zukunft passive Sicherheitsmaßnahmen ergänzen. Fahrerassistenzsysteme sollen nicht erst bei unabwendbarem Unfalleintritt die Folgen eines Unfallereignisses minimieren, vielmehr haben sie zum Ziel, Unfälle ganz zu vermeiden. Fahrfehler in der Spurhaltung, die zu einem ungewollten Verlassen der Fahrspur führen sowie Fehler beim Spurwechsel beispielsweise durch die Fehleinschätzung herannahender Fahrzeuge führen häufig zu Unfällen. Ein Querführungsassistent, der bisherige Systemansätze zur Spurverlassenswarnung, Spurhalteunterstützung und Spurwechselasistent vereint, unterstützt den Fahrer bei Spurhaltung und Spurwechsel. Ausgehend von Ansätzen des Systems Engineering wurde dazu ein dem Entwicklungsprozess angepasstes Vorgehen vorgestellt, das über die Stationen „Situationsanalyse“, „Zieldefinition“, „Systemspezifikation“ und „Bewertung“ zu einem fahrrergerecht ausgelegten System führt.

Fahrerassistenzsysteme greifen stärker als bisher bekannte Technologien in die Fahrhandlung mit ein. Dies führt zu gänzlich neuen Herausforderungen, denen nur mit einer benutzerzentrierten Entwicklung und fahrrergerechten Auslegung eines Assistenzsystems bestehen werden kann. Den Fahrer in den Fokus zu stellen bedeutet allerdings auch, zu wissen, wo Stärken und Schwächen, mögliche Fehlerquellen und mögliches Unterstützungspotential liegen. Diesem Sachverhalt wurde in einem eigenen Abschnitt Rechnung getragen. Um die Betrachtungen des aktuellen Kenntnisstandes abzurunden, wurden Fahrerassistenzsysteme hinsichtlich ihrer Kategorisierung, Architektur, Funktionalität und ihrer Mensch-Maschine-Schnittstelle analysiert.

Im Rahmen einer Unfalldatenanalyse wurden mehrere Tausend Unfälle hinsichtlich ihrer Relevanz für einen Querführungsassistenten untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass ein erheblicher Teil von Unfällen besonders auf Autobahnen und Landstraßen von einem solchen System potentiell vermieden werden kann.

Als Möglichkeit zur frühzeitigen Einbindung von Kundenmeinung- und Wünschen in den Spezifikationsprozess wurde eine Multimediale Kundenbefragung vorgestellt. Diese lieferte bereits in einem frühen Stadium des Produktentwicklungsprozesses wichtige Anhaltspunkte zur Auslegung der Systemfunktionalität. Im Rahmen einer Expertenbefragung konnten Bewertungskriterien erarbeitet werden, die eine Beurteilungsbasis verschiedener Sensortechnologien hinsichtlich ihrer Verwendung in Applikationen der Fahrerassistenz generell und speziell hinsichtlich ihrer Verwendung in einem Querführungsassistenten definieren. Die Ergebnisse der Unfalldatenanalyse, der multimedialen Kundenbefragung sowie der Expertenbefragung zur Sensorarchitektur flossen direkt in die Systemspezifikation mit ein.

Im Folgenden rückte die Auslegung der Mensch-Maschine-Schnittstelle in den Blickpunkt. Im Rahmen einer Simulatoruntersuchung konnten im Vergleich verschiedener Signaltypen diejenigen identifiziert werden, die zu einer besonders schnellen Reaktion des Fahrers in Gefahrensituationen führen. Besonders Lenkmoment und Lenkradvibration zeigen hier Möglichkeiten auf, den ohnehin schon stark beanspruchten visuellen Kanal zu entlasten. Daher lag bei der Betrachtung möglicher Ausprägungen der Mensch-Maschine-Schnittstelle der Fokus auf Lösungen, die auf optischen und haptischen Signalen basieren.

Um die Ergebnisse und Ansätze auch unter realitätsnahen Bedingungen untersuchen zu können, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Versuchsfahrzeug aufgebaut. Dieses Fahrzeug stellte die Plattform für weiterführende empirische Fahrversuche dar. Zudem diente es als Präsentationsfahrzeug für die Ergebnisse der AUDI AG innerhalb der Forschungsinitiative INVENT, die sehr stark die in dieser Arbeit erarbeiteten Inhalte beeinflusste.

Im Rahmen dreier Fahrversuche wurden Aspekte der Systemgestaltung aufgegriffen und untersucht. Die Versuche lieferten wichtige Anhaltspunkte zur Schnittstellenmodalität, zum Unterstützungsgrad und zur Spurwechsellerkennung. So konnte im Rahmen dieser Arbeit gezeigt werden, dass eine Auslegung eines integrierten Systems über nur eine haptische Schnittstelle zu keinen feststellbaren negativen Effekten hinsichtlich Beanspruchung, Erlernbarkeit und Akzeptanz führt. Es wurden anschließend Ansätze entwickelt und beschrieben, die die Umsetzung und Skalierung verschiedener Automatisierungsgrade erlauben. Der zweite Fahrversuch, der auf dieser Lösung aufbaute, zeigte, dass die Akzeptanz der Kunden für den Querführungsassistenten nachweisbar sinken kann, je autonomer ein Assistenzsystem in die Fahrzeugführung eingreift. Die multimediale Kundenbefragung ergab, dass Modelle zur Vorhersage des Querführungsverhaltens die Systemfunktionalität nach Meinung der Kunden sinnvoll ergänzen können. Deshalb wurden zwei, sich ergän-

zende Ansätze vorgestellt, um einerseits die Spurwechselmotivation anhand der Verkehrssituation vorhersagen zu können und andererseits durch die Analyse der fahrerindividuellen Fahrtrajektorie den Zeitpunkt eines Fahrspurwechsels zu beschreiben. Die Bewertung dieser Lösungen im dritten Fahrversuch ergab, dass die Ansätze zufrieden stellend funktionieren und für einen Einsatz in einem Querführungsassistenten bereitstehen.

Aufgrund der sehr realitätsnahen Evaluierung der Ansätze, die diese Arbeit prägt, erfolgte auch die Bewertung des Gesamtsystems im Rahmen eines empirischen Fahrversuches. Jener zeigt, dass der Querführungsassistent in allen akzeptanzbezogenen Kriterien positiv bewertet wird. Zwei zu unterschiedlichen Zeitpunkten durchgeführte Preisbereitschaftsmessungen, lassen vermuten, dass Assistenzsysteme erfahren werden müssen, um Begehrlichkeiten zu wecken und eine deutlich höhere Preisbereitschaft zu realisieren.

Fahrer und Assistenzsystem sind Kooperationspartner mit dem Ziel, die Fahrzeugführung für sich und andere Verkehrsteilnehmer sicherer zu machen. Gleichzeitig aber müssen nach wie vor die Wünsche des Menschen bezüglich der Freude und Selbstbestimmung beim Autofahren berücksichtigt werden. Unter dieser Prämisse können die in der vorliegenden Arbeit vorgestellten Ansätze und Untersuchungen wichtige Gestaltungshinweise für ein System zur Unterstützung des Fahrers in querführenden Fahrmanövern liefern. So kann ein Querführungsassistent entwickelt werden, der die Anforderungen an Sicherheits-effekt, Kundenakzeptanz und Wirtschaftlichkeit erfüllt.

A Fragebogen Bewertung des Gesamtsystems

Versuchspersonen-Nr.: _____

Datum: _____

Versuchs-Nr.: _____

1. Wie gut wahrnehmbar ist die gelbe und rote Anzeige im <u>linken</u> Außenspiegel, wenn Sie sich normal auf den Verkehr konzentrieren?					
	sehr gut wahrnehmbar	gut wahrnehmbar	Weder noch	schlecht wahrnehmbar	sehr schlecht wahrnehmbar
Die Anzeige im linken Außenspiegel ist...	☐	☐	☐	☐	☐
2. Und wie gut wahrnehmbar ist die gelbe und rote Anzeige <u>rechts</u> ?					
	sehr gut wahrnehmbar	gut wahrnehmbar	Weder noch	schlecht wahrnehmbar	sehr schlecht wahrnehmbar
Die Anzeige im rechten Außenspiegel ist...	☐	☐	☐	☐	☐
3. Sollten die Anzeigen heller oder weniger hell sein?					
	Deutlich heller	Etwas heller	Genau richtig	Etwas weniger hell	Deutlich weniger hell
gelb links	☐	☐	☐	☐	☐
rot links	☐	☐	☐	☐	☐
gelb rechts	☐	☐	☐	☐	☐
rot rechts	☐	☐	☐	☐	☐
4. Die gelbe Anzeige ist ja ständig aktiv. d.h. sie leuchtet immer auf, wenn sich ein Fahrzeug seitlich in der Nachbarspur befindet oder herannäht. Empfinden Sie dies als ablenkend vom Verkehrsgeschehen?					
	Überhaupt nicht ablenkend	Kaum ablenkend	Teils teils	ablenkend	Stark ablenkend
Die gelbe Anzeige ist...	☐	☐	☐	☐	☐
5. Stört es Sie, dass die gelbe Anzeige ständig aktiv ist?					
	Stört überhaupt nicht	Stört kaum	Stört Teils teils	Stört	Stört sehr
Die gelbe Anzeige ist...	☐	☐	☐	☐	☐

6. Empfinden Sie die gelbe Anzeige insgesamt als geeignet für diesen Zweck?					
	Sehr gut geeignet	geeignet	Teils teils	Weniger geeignet	Überhaupt nicht geeignet
Die gelbe Anzeige ist...	☐	☐	☐	☐	☐
Empfinden Sie die rot-blinkende Warnung insgesamt als geeignet für diesen Zweck?					
	Sehr gut geeignet	geeignet	Teils teils	Weniger geeignet	Überhaupt nicht geeignet
Die gelbe Anzeige ist...	☐	☐	☐	☐	☐
7. Wenn Sie die Anzeige im Außenspiegel (gelber bzw. rot-blinkender Ring) insgesamt beurteilen: Welche Schulnote vergeben Sie?					
sehr gut	gut	befriedigend	ausreichend	mangelhaft	ungenügend
☐	☐	☐	☐	☐	☐
8. Welche Verbesserungsvorschläge haben Sie hinsichtlich der Anzeige?					
9. Die Lenkradvibration warnt Sie bei unbeabsichtigtem Verlassen der eigenen Fahrspur. Wie gut wahrnehmbar ist die Vibration des Lenkrads?					
	sehr gut wahrnehm- bar	gut wahr- nehmbar	Weder noch	schlecht wahrnehm- bar	sehr schlecht wahrnehmbar
Die Lenkradvibration ist ...	☐	☐	☐	☐	☐
10. Wie beurteilen Sie die Stärke der Lenkrad-Vibration?					
	Viel zu stark	Etwas zu stark	Genau richtig	Etwas zu schwach	Viel zu schwach
Die Lenkradvibration ist ...	☐	☐	☐	☐	☐
11. Empfinden Sie die Warnung durch Lenkradvibration als ablenkend vom Verkehrsgeschehen?					
	Überhaupt nicht ab- lenkend	Kaum ab- lenkend	Teils teils	ablenkend	Stark ablen- kend
Die Warnung durch Lenkradvib- ration ist...	☐	☐	☐	☐	☐

12. Inwieweit würde es Sie stören, wenn Sie bei jedem Spurverlassen, bei dem Sie den Blinker nicht gesetzt haben, die Vibrations- Warnung am Lenkrad erhalten?					
	Sehr stören	Ziemlich stören	Teils teils	Weniger stören	Überhaupt nicht stören
Die Vibrations-Warnung würde mich ...	☐	☐	☐	☐	☐
13. Halten Sie die Lenkradvibration insgesamt geeignet als Warnung bei Verlassen der Fahrspur?					
	Sehr gut geeignet	geeignet	Teils teils	Weniger geeignet	Überhaupt nicht geeignet
Die Lenkradvibration ist ...	☐	☐	☐	☐	☐
14. Wenn Sie die Warnung durch Lenkradvibration insgesamt beurteilen: Welche Schulnote vergeben Sie?					
sehr gut	gut	befriedigend	ausreichend	mangelhaft	ungenügend
☐	☐	☐	☐	☐	☐
15. Welche Verbesserungsvorschläge haben Sie hinsichtlich der Vibration?					
16. Das kurze Gegenlenken des Lenkrads warnt Sie bei unbeabsichtigtem Verlassen der eigenen Fahrspur und dient als Warnung beim Spurwechsel. Wie gut wahrnehmbar ist das kurze Gegenlenken des Lenkrads?					
	sehr gut wahrnehmbar	gut wahrnehmbar	Weder noch	schlecht wahrnehmbar	sehr schlecht wahrnehmbar
Das Gegenlenken ist ...	☐	☐	☐	☐	☐
17. Wie beurteilen Sie die Stärke des Gegenlenkens des Lenkrads?					
	Viel zu stark	Etwas zu stark	Genau richtig	Etwas zu schwach	Viel zu schwach
Das Gegenlenken ist ...	☐	☐	☐	☐	☐
18. Empfinden Sie das kurze Gegenlenken des Lenkrads als ablenkend vom Verkehrsgeschehen?					
	Überhaupt nicht ablenkend	Kaum ablenkend	Teils teils	ablenkend	Stark ablenkend
Das Gegenlenken ist ...	☐	☐	☐	☐	☐

19. Inwieweit würde es Sie stören, wenn Sie bei jedem Spurverlassen, bei dem Sie den Blinker nicht gesetzt haben, das kurze Gegenlenken am Lenkrad erhalten?					
	Sehr stören	Ziemlich stören	Teils teils	Weniger stören	Überhaupt nicht stören
Das Gegenlenken würde mich ...	☐	☐	☐	☐	☐
20. Halten Sie das kurze Gegenlenken des Lenkrads insgesamt geeignet als <u>Warnung bei Verlassen</u> der Fahrspur?					
	Sehr gut geeignet	geeignet	Teils teils	Weniger geeignet	Überhaupt nicht geeignet
Das Gegenlenken ist ...	☐	☐	☐	☐	☐
21. Das Gegenlenken haben Sie auch als <u>Warnung beim Spurwechsel</u> erlebt. Halten Sie das kurze Gegenlenken des Lenkrads insgesamt geeignet als Warnung beim Spurwechsel?					
	Sehr gut geeignet	geeignet	Teils teils	Weniger geeignet	Überhaupt nicht geeignet
Das Gegenlenken ...	☐	☐	☐	☐	☐
22. Wenn Sie das kurze Gegenlenken des Lenkrads insgesamt beurteilen: Welche Schulnote vergeben Sie?					
sehr gut	gut	befriedigend	ausreichend	mangelhaft	ungenügend
☐	☐	☐	☐	☐	☐
23. Welche Verbesserungsvorschläge haben Sie hinsichtlich des Gegenlenkens?					
24. Sie haben das QFA-System kennen gelernt, ohne vorher über die Funktionsweise informiert worden zu sein. Halten Sie das QFA-System ohne Erklärung für verständlich?					
sehr gut verständlich	verständlich	Teils teils	Kaum verständlich	Überhaupt nicht verständlich	
☐	☐	☐	☐	☐	
25. Waren die Reaktionen des QFA-Systems im Voraus gut abschätzbar? Wie beurteilen Sie die Vorhersehbarkeit der Reaktionen des QFA-Systems?					
sehr gut vorhersehbar	gut vorhersehbar	Teils teils	schlecht vorhersehbar	sehr schlecht vorhersehbar	
☐	☐	☐	☐	☐	
26. Stimmen die Einschätzungen des Systems mit Ihren eigenen Einschätzungen der Situation überein?					

stimmten immer überein	stimmten meistens überein	stimmten teils teils überein	stimmten meistens nicht überein	stimmten überhaupt nicht überein
☐	☐	☐	☐	☐

Wenn nicht immer übereinstimmend ...
Warum kommen Sie zu dieser Einschätzung? In welchen Situationen stimmten die System Einschätzungen nicht überein?

27. Das QFA-System zeigt Ihnen an, ob die Nachbarspur belegt ist.
Wie beurteilen Sie den Zeitpunkt der Anzeige?

Wurde die Belegung der Spur vom System rechtzeitig, zu früh oder zu spät angezeigt?

	Viel zu früh	Etwas zu früh	Genau richtig	Etwas zu spät	Viel zu spät
bei überholenden Fahrzeugen auf der linken Spur	☐	☐	☐	☐	☐

28. Wurde die Nachbarspur vom System eher zu früh oder eher zu spät als „nicht mehr belegt“ angezeigt?

	Viel zu früh	Etwas zu früh	Genau richtig	Etwas zu spät	Viel zu spät
bei Fahrzeugen auf der linken Spur, die einen überholen	☐	☐	☐	☐	☐

29. Insgesamt gesehen, inwieweit waren diese Reaktionen des Systems für Sie akzeptabel?

Eher akzeptabel	Eher akzeptabel	Teils teils akzep- tabel	Eher nicht akzep- tabel	Unakzeptabel
☐	☐	☐	☐	☐

Wenn nicht akzeptabel:
Warum kommen Sie zu dieser Einschätzung? Welche Reaktionen waren nicht akzeptabel?

30. Wenn Sie jetzt einmal an die Situation des unbeabsichtigten Spurverlassens denken:
Hierbei bietet der Querverführungsassistent zwei Warnungen
- Zum einen die Warnung durch Vibration des Lenkrads,
- zum anderen die Warnung durch kurzes Gegenlenken am Lenkrad
Welche Warnung bevorzugen Sie?

☐ Warnung durch Vibration des Lenkrads
☐ Warnung durch kurzes Gegenlenken am Lenkrad
☐ (keine Warnung dieser Art)

31. Wenn Sie jetzt einmal an die Situation des Spurwechsels denken:

Hierbei bietet das QFA System

- ⇒ zum einen eine permanente Information über die Belegung der Nachbarspur, die gelbe Anzeige im Außenspiegelgehäuse rechts und links, (auch ohne Spurwechselabsicht)
- ⇒ und zum anderen die Warnung, wenn beim beabsichtigten Spurwechsel eine Kollision mit einem Fahrzeug auf der Zielspur droht (die rot-blinkende Anzeige im Außenspiegelgehäuse bzw. der kurze Lenkeingriff)

Wünschen Sie ein System, das

- ☐ zusätzlich zur Warnung auch eine permanente Information bietet
- ☐ keine permanente Information bietet, sondern nur warnt oder
- ☐ (nur Information, keine Warnung)
- ☐ (keine Warnung dieser Art)

32. Neben der Anzeige im Außenspiegel haben Sie auch das kurze Gegenlenken am Lenkrad (bzw. oder auch die Lenkradvibration) als Warnmöglichkeit bei beabsichtigten Spurwechsel kennen gelernt, wenn Kollision mit einem Fahrzeug auf der Zielspur droht.

Wie möchten Sie beim beabsichtigten Spurwechsel gewarnt werden?

- ☐ Nur Warnung im Außenspiegel (rotes Blinken)
- ☐ Warnung im Außenspiegel & kurzes Gegenlenken am Lenkrad
- ☐ Warnung im Außenspiegel & Vibration am Lenkrad
- ☐ (nur kurzes Gegenlenken am Lenkrad, keine Anzeige)
- ☐ (Anzeige im Außenspiegel und Vibration am Lenkrad)
- ☐ (keine Warnung dieser Art)

33. Sie haben die Spurwechsel-Information bzw. Warnung nach links und nach rechts kennen gelernt. Wünschen Sie die Spurwechsel-Information bzw. Warnung auch auf beiden Seiten oder lieber nur zur linken Seite hin?

- ☐ soll nur bei einem Spurwechsel nach links informieren bzw. warnen
- ☐ soll bei einem Spurwechsel sowohl nach links als auch nach rechts warnen

34. Das QFA -System empfinde ich generell als...

	sehr	eher	weder noch	eher	sehr	
gut	☐	☐	☐	☐	☐	schlecht
die Verkehrssicherheit erhöhend	☐	☐	☐	☐	☐	Die Verkehrssicherheit ver- mindernd
den Fahrkomfort erhöhend	☐	☐	☐	☐	☐	den Fahrkomfort vermindernd
unangenehm	☐	☐	☐	☐	☐	angenehm
nützlich	☐	☐	☐	☐	☐	nutzlos

entspannend	☐	☐	☐	☐	☐	belastend
kontrollierbar	☐	☐	☐	☐	☐	unkontrollierbar
bevormundend	☐	☐	☐	☐	☐	unterstützend
verbesserungswürdig	☐	☐	☐	☐	☐	ausgereift
anschaffenswert	☐	☐	☐	☐	☐	nicht anschaffenswert

35. Angenommen, Sie schaffen sich innerhalb der nächsten zwei Jahre ein neues Fahrzeug an, würden Sie das QFA-System als Sonderausstattung kaufen?

☐ ... ja, bestimmt
☐ ... ja, vielleicht
☐ ... nein, bestimmt nicht

36. Ab welchen Preis halten Sie das QFA-System für günstig, so dass es aus Ihrer Sicht ein guter Kauf ist?

--- --- --- --- €

37. Ab welchen Preis halten Sie das QFA-System für teuer, würden es aber trotzdem kaufen?

--- --- --- --- €

38. Ab welchem Preis halten Sie das QFA-System für so billig, so dass Sie die Qualität anzweifeln würden?

--- --- --- --- €

39. Ab welchem Preis halten Sie das QFA-System für zu teuer, so dass ein Kauf für Sie nicht in Frage käme?

--- --- --- --- €

Literatur

- [1] Ackermann, J.: *Robuste Regelung*. Berlin u.a.O: Springer Verlag, 1993.
- [2] Ameling, Ch.: *Steigerung der aktiven Sicherheit von Kraftfahrzeugen durch ein Kollisionsvermeidungssystem*. Dissertation, Univ. der Bundeswehr Hamburg, 2002.
- [3] Antonello, P.C.; Bozzo, S.; Damiani, S.: *Driver Steering Task Support System to Improve Vehicle Lateral Control*. XXVI. FISITA Congress, Prag (Tschechien), 1996.
- [4] Apel, A.: *Modellierung des Fahrerverhaltens bei Längs- und Querführung von PKW*. Clausthal-Zellerfeld: Papierflieger, 1988.
- [5] Baumann, M.: *Experimentelle Untersuchung der zeitlichen Dynamik visueller Aufmerksamkeitsverteilung*. Diplomarbeit, Universität Regensburg, 1995.
- [6] Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie (2000): *Chancen für Bayern – Bayern 2020*. Studie der Technologie- und Unternehmensberatung Arthur D. Little Inc., URL: http://www.kontiv2002.de/pdf/ergebnisbericht_mid_ende_144_punkte.pdf [Stand: 01.01.2003].
- [7] Behringer, R.: *Visuelle Erkennung und Interpretation des Fahrspurverlaufs durch Rechnersehen für ein autonomes Straßenfahrzeug*. Dissertation, Univ. der Bundeswehr München, 1996.
- [8] Bielaczek, Ch.: *Untersuchungen zur Auswirkung einer aktiven Fahrerbeeinflussung auf die Fahr-sicherheit beim Pkw-Fahren im realen Straßenverkehr*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 357, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1998.
- [9] Brannolte, U.: *Verkehrsablauf an Steigungsstrecken von Richtungsfahrbahnen*. In: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, 318, 1980.
- [10] Breuer, J.: *Ergonomische Beurteilung und Gestaltung der Sicherheit des Arbeitssystems Kraftfahrzeugführen*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 271, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1996.
- [11] Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (Hrsg.) (2004): *Mobilität in Deutschland 2002. Ergebnisbericht des Institut für angewandte Sozialwissenschaft (infas) und des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung (DIW)*, URL: http://www.kontiv2002.de/pdf/ergebnisbericht_mid_ende_144_punkte.pdf [Stand: 01.01.2003].
- [12] Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (Hrsg.): *Verkehr in Zahlen 2004/2005*. 33. Jg., Hamburg: Deutscher Verkehrs-Verlag, 2004.
- [13] Bubb, H.: *Haptik im Kraftfahrzeug*, In: Jürgensohn, T.; Timpe, K.-P. (Hrsg.): *Kraftfahrzeugführung*, Berlin: Springer-Verlag, S. 155-175, 2001.
- [14] Bubb, H.: *Analyse der Geschwindigkeitswahrnehmung im Kraftfahrzeug*. In: Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, Jg. 31, 2, S. 103-111, 1977.
- [15] Busch, S.: *Unfallanalysen zu Kreuzungs-/Gegenverkehrsunfällen*. Workshop INVENT VAS vom 17./18. März 2003, Wolfsburg, 2003.
- [16] Buschardt, B.: *Synthetische Lenkmomente*. Berichte aus dem Zentrum Mensch-Maschine-Systeme der Technischen Universität Berlin. Reihe 22, Nr. 12, 2003.
- [17] Cavallo, V.; Laurent, M.: *Visual information and skill-level in time to collision estimation*. In: Perception, 17, S. 623-626, 1988.

- [18] Chaloupka, Ch. et al.: *Auswirkungen neuer Technologien im Fahrzeug auf das Fahrverhalten*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft M 84, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 1998.
- [19] Chovan, J.D. et al.: *Examination of lane change crashes and potential IVHS countermeasure*. National Highway Traffic Safety Administration, Washington DC (USA). 1994.
- [20] De Micheli, E.; Prevete, R.; Piccioli, G.; Campani, M.: *Color cues for traffic scene analysis*. In: Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium 1995, Detroit (USA), S. 466-471, 1995.
- [21] Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (Hrsg): *Fahrleistungen und Kraftstoffverbrauch im Straßenverkehr*. Wochenbericht 51, URL: <http://www.diw.de/deutsch/produkte/publikationen/wochenberichte/docs/02-51-1.html> [Stand 01.07.2002].
- [22] Dickmanns, E. D. et al.: *The Seeing Passenger Car ,VaMoRs-P'*. In: Proceedings of the International Symposium on Intelligent Vehicles, Paris (Frankreich), 1994.
- [23] Dickmanns, D.: *Rahmensystem für visuelle Wahrnehmung zeitlich veränderlicher Szenen durch Computer*. Dissertation, Univ. der Bundeswehr München, 1996.
- [24] Donges, E.: *Das Prinzip Vorhersehbarkeit als Auslegungskonzept für Maßnahmen zur Aktiven Sicherheit im Straßenverkehrssystem*. VDI-Berichte, Nr. 948, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1992.
- [25] Donges, E.: *Ein regelungstechnisches Zwei-Ebenen-Modell des menschlichen Lenkverhaltens im Kraftfahrzeug*. In: Zeitschrift für Verkehrssicherheit, Jg. 24, 3, S. 98-112, 1978.
- [26] Donges, E.: *Experimentelle Untersuchung und regelungstechnische Modellierung des Lenkverhaltens von Kraftfahrern bei simulierter Straßenfahrt*. Dissertation, TH Darmstadt, 1977.
- [27] Ehmanns, D.: *Modellierung des taktischen Fahrerverhaltens bei Spurwechselvorgängen*. Dissertation, RWTH Aachen, 2002.
- [28] Ehmanns, D.; Hochstädter, A.: *Driver Model of Lane Change Maneuvers*. 7th World Congress on Intelligent Transport Systems, Turin (Italien), 2000.
- [29] Europäische Kommission: *Die Europäische Verkehrspolitik bis 2010: Weichenstellungen für die Zukunft*. Weißbuch der Europäischen Kommission vom 12. September 2001, KOM(2001)370, 2001.
- [30] Ewert, U.: *Internationaler Vergleich der Verkehrsunfallstatistik*. In: Zeitschrift für Verkehrssicherheit, 49. Jg., 3, S. 105-108, 2003.
- [31] Fairbanks, R. J.; Fahey, S.; Wierwille, W.W.: *Research on Vehicle-Based Driver Status/ Performance Monitoring*. 7th Semi-Annual Research Report, U.S. Department for Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, Semi-Annual Report, DOT HS 808 299, 1995.
- [32] Fastenmeier et al.: *Analyse von Spurwechselvorgängen im Verkehr*. In: Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, Jg. 55, 2001/1, S. 15–23, 2001.
- [33] Fastenmeier, W.; Gstalter, H.: *Ablenkungseffekte durch neuartige Systeme im Fahrzeug*. In: Willumeit, H.-P. (Hrsg.): *Wohin führen Unterstützungssysteme? Entscheidungshilfe und Assistenz in Mensch-Maschine-Systemen*, Pro Universitate Verlag, Sinzheim, S. 70-82, 1998.
- [34] Fenton, R. E.: *IVHS/ AHS: Driving into the Future*. IEEE Control System Magazine Vol. 14, S. 13-20, 1994.

- [35] Feraric, J. P.: *Echtzeitfähige Modellierung des individuellen Fahrverhaltens zur Realisierung adaptiver Unterstützungsfunktionen in einem Monitor- und Warnsystem*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, 1996.
- [36] Fey, S.: *Parameteroptimierung der Umfeldüberwachung eines Querführungsassistenten*. Diplomarbeit, BA Ravensburg, 2004.
- [37] Förster, H.-J.: *Der Mensch, ein Homo Instrumentalis*. VDI-Berichte, Nr. 948, Düsseldorf: VDI-Verlag, S. 379-443, 1992.
- [38] Gibson, J.J.: *The senses considered as perceptual systems*. Houghton Mifflin, Boston (USA), 1996.
- [39] Gibson, J.J.: *The ecological approach to visual perception*. Houghton Mifflin, Boston (USA), 1979.
- [40] Godthelp, H.: *Studies on Human Vehicle Control*. Dissertation, TNO Soesterberg (NL), 1984.
- [41] Gehring, O.: *Automatische Längs- und Querführung einer Lastkraftwagenkollonne*. Dissertation, Universität Stuttgart, 2000.
- [42] Groeger, J.A.: *Assessing distance, speed and time*. In: Groeger, J.A.: *Understanding Driving* (1-23). Psychology Press, Taylor&Francis Group, Philadelphia (USA), 2002.
- [43] Hackenberg, U.: *Fahrzeugsicherheit im Wandel*. In: VDI (Hrsg.): *Innovativer Kfz- Insassen- und Partnerschutz*. Beiträge zur gleichnamigen Tagung vom 6. bis 7. September 3001, VDI-Berichte, Nr. 1637, Düsseldorf: VDI Verlag, 2001.
- [44] Hackenberg, U./ Heißing, B.: *Die fahrdynamische Leistung des Fahrer-Fahrzeug-Systems im Straßenverkehr*. In: ATZ, 7/8, S. 341-345, 1984.
- [45] Hacker, W.: *Arbeitspsychologie, Psychische Regulation von Arbeitstätigkeiten*. Bern: Hans Huber Verlag, 1986.
- [46] Hackl, A.: *Ermittlung des Spurwechsels als Steuergröße für den Spurwechselassistenten*. Diplomarbeit, FH München, 2002.
- [47] Häkkinen, S.: *Large scale field experiments on driver behaviour*. In: Zeitschrift für Verkehrssicherheit, Jg. 20, 2, S. 75-92, 1974.
- [48] Hancock, P.A.; Manser, M.P.: *Time-To-Contact: more than Tau alone*. In: *Ecological Psychology*, 9, S. 265-297, 1997.
- [49] Hargutt, V.; Krüger, H.-P.: *Die Gefahr der Unterforderung? Selbstregulation der Aktivierung in der Fahrsimulation*, Düsseldorf: VDI-Verlag, 2002.
- [50] Heineken, E.: *Wissenserwerb und Wissensabruf*. Koblenz: BWB, 1996.
- [51] Heinrich, H.-Ch.; Porschen, K.: *Die Bedeutung interaktiver Unfallmodelle für die Straßenverkehrssicherheitsforschung*. In: Zeitschrift für Verkehrssicherheit, Bd. 35, 1, S. 8 – 16, 1998.
- [52] Hoess, A.: *Realisation of an Intelligent Cruise Control System Using Classification of Distance, Relative Speed and Vehicle Speed Information*. In: *Proceedings of the International Symposium on Intelligent Vehicles*, Paris (Frankreich), S. 7-12, 1994.
- [53] Hoffman, E.R.; Mortimer, R.G.: *Drivers' estimates of time to collision*. In: *Accident Analysis and Prevention*, Jg. 26, 4, S. 511-520, 1994.
- [54] Irmscher, M.: *Modellierung und Simulation von Motivationseinflüssen auf das Fahrerverhalten*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 22, Nr. 6, Düsseldorf: VDI-Verlag, 2001.

- [55] Jürgensohn, T.: *Hybride Fahrermodelle*. Sinzheim: Pro Universitate Verlag, 1997.
- [56] Kawai, M.; Ishida, S.; Tsuji, T.: *Intelligent vehicle and Advanced Safety Technology*, In: Review of Automotive Engineering, 25, S. 179-184, 2004.
- [57] Kienast, H.: *Untersuchung verschiedener Warnsignale und Warnkriterien eines Spurwechselassistenten*, Diplomarbeit, TU Chemnitz, 2004.
- [58] Knoll, M.: *Das „sensitive Auto“*. In: auto & elektronik, 2-3, S. 10-14, 2003.
- [59] Kondo, M.: *Directional Stability (When Steering is added)*. In: Journal of the Society of Automotive Engineers of Japan (JSAE), 7, Nr. 5 und 6, S. 104-106, 109, 123, 136-140, 1953.
- [60] Kopf, M.: *Ein Beitrag zur modellbasierten, adaptiven Fahrerunterstützung für das Fahren auf deutschen Autobahnen*. VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 12, Nr. 203, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1994.
- [61] Krüger, H.-P.: *Fahrerzustandsoptimierung*, Tagung „Fahrerassistenzsysteme“, 29.-30. November 2000, Haus der Technik, Essen, 2000.
- [62] Lages, U.: *Untersuchungen zur aktiven Unfallvermeidung von Kraftfahrzeugen*. VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 12, Nr. 446, Düsseldorf: VDI-Verlag, Düsseldorf, 2001.
- [63] Lee, D.N.: *A theory of visual control of braking based on information of time to collision*. In: Perception, 5, S. 437-459, 1976.
- [64] Leefken, I.: *Nichtlineare Dynamiken zur Szenenrepräsentation und Verhaltensgenerierung in einer Architektur zu Fahrerassistenz*, Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, 2001.
- [65] Leibowitz, H. W.; Apellele, S.: *The effect of a central task on luminance thresholds for peripherally presented stimuli*. In: Human Factors, 11, 4, S. 387-392, 1969.
- [66] Majjad, R.: *Hybride Modellierung und Identifikation eines Fahrer-Fahrzeug Systems*, Dissertation, Universität Fridericiana Karlsruhe, 1997.
- [67] Mann, M.; Popken, M.: *Auslegung einer fahroptimierten Mensch-Maschine-Schnittstelle am Beispiel eines Querführungsassistenten*. In: Gesamtzentrum für Verkehr Braunschweig (Hrsg.): Automatisierungs- und Assistenzsysteme für Transportmittel- 5. Braunschweiger Symposium vom 17. und 18. Februar 2004. Braunschweig: GZVB, 2004.
- [68] Marstaller, R.: *Fahrerverhaltensänderungen bei der fahrerassistierten Kfz-Steuerung mit aktiven Bedienelementen gegenüber dem konventionellen Bedienkonzept*. In: Proceedings of VDI/SAE/JSAE Gemeinschaftstagung „Der Fahrer im 21. Jahrhundert“, Berlin 3.-4. Mai 2001, VDI-Berichte 1613, Düsseldorf: VDI-Verlag, S. 297-313, 2001.
- [69] McRuer et al.: *Human Pilot Dynamics in Compensatory Systems*, Wright-Patterson AFB, 1965.
- [70] Mehring, S.; Franke, U.; Suissa, A.: *Optische Spurhaltung- Eine Unterstützung des Fahrers bei der Lenkaufgabe*. In: at-Automatisierungstechnik, 44. Jg., 5, S. 238-242, 1996.
- [71] Metzler, H.-G. (1998): *Assistenzsysteme in der Fahrzeugführung*. In: Willumeit, H.-P. (Hrsg.): Wohin führen Unterstützungssysteme? Entscheidungshilfe und Assistenz in Mensch-Maschine-Systemen. Sinzheim: Pro Universitate Verlag, 1998.
- [72] Motoyama, S.: *Development of Lane Departure Warning System*. 7th World Congress on Intelligent Transport Systems IST, 6.-9. November 2000 Turin (Italien), 2000.

- [73] Mourant, R.; Al-Shihabi, T.: *A Framework for Modeling Human-like Driving Behaviors for Autonomous Agents*. In: Proceedings of 5th International Conference on Autonomous Agents, Montreal (Kanada): ACM-Press, 2001.
- [74] Mutschler, H.: *Technical report: Warning systems in vehicles*. ISO/TC 22/SC 13/WG 8 N 333, Beratungsbüro für Ergonomische Fragen (Hrsg.), Karlsruhe, 2001.
- [75] Naab, K.: *ACC in Ballungsräumen*. 7. Aachener Kolloquium für Fahrzeug- und Motorentechnik, 5. bis 7. Oktober, Aachen, S. 551-566, 1998.
- [76] Naab, K./ Reichart, G. (1998): *Grundlagen der Fahrerassistenz und Anforderungen aus Nutzersicht*. Seminar Fahrerassistenzsysteme, Haus der Technik, 16.-17. November 1998, Essen, 1998.
- [77] Näätänen, R.; H. Summala: *Road User Behaviour and Traffic Accidents*. Amsterdam (NL): North-Holland Publishing Co., 1976.
- [78] Olsen, E.C.B. et al. (2002): *Analysis of distribution, frequency and duration of naturalistic lane changes*. Proc. of 46th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society. URL: http://filebox.vt.edu/users/eolsen/files/papers/olsen_lee_wierwille_goodman_2002_HFES.pdf [Stand 01.07.2002].
- [79] o.V.: *Der Brockhaus in einem Band*. 11. aktualisierte Aufl., Mannheim: Brockhaus, 2005.
- [80] o.V. (2005): *DaimlerChrysler Nutzfahrzeuge erzielen 2004 einen Rekordabsatz*. Pressemitteilung der DaimlerChrysler AG. URL: http://webkatalog.emtotal.de/pressemitteilungen/auto/daimler_chrysler_nutzfahrzeuge_mit%20rekordabsatz.html [Stand: 01.07.2005].
- [81] o.V. (2005): *Spurtreu und Sicher*. DaimlerChrysler Hightech Report 1/2005, URL: http://www.daimlerchrysler.com/Projects/c2c/channel/documents/682158_hightechreport_01_2005_esp_g.pdf [Stand: 01.07.2005].
- [82] o.V. (2005): AFIL. URL: http://www.citroen.de/CWG/ueber_citroen/Innovation_und_Technik/technik_und_sicherheit/AFIL/ [Stand: 01.07.2005].
- [83] o.V. (2005): *Advanced Lane Departure Warning System Set to Debut on 2005 Infiniti FX and 2006 Infiniti M45*. URL: http://www.infiniti.com/content/0,,cid-34014_sctid-52137,00.html [Stand 01.07.2005].
- [84] o.V. (2005): *LGS – Lane Guard System*. Online im Internet: URL [http://www.mann.com/de/innovationundkompetenz/Assistenzsysteme/Spurverlassenswarner___\(LGS\).jsp](http://www.mann.com/de/innovationundkompetenz/Assistenzsysteme/Spurverlassenswarner___(LGS).jsp) [Stand 01.07.2005].
- [85] o.V. (2005): *Volvo Cars stellt vorsorgende Sicherheit in den Mittelpunkt*. Pressemitteilung von Volvo Cars, URL http://de.volvocars.ch/_Tier3/AboutUs/NewsEvents/News/ [Stand 01.07.2005].
- [86] o.V. (2004): *VW-Forschung: ESP ist effizienter als Airbag*. Meldung vom 24.07.2004, URL: http://www.meinlupo.de/update2004/scripts/news/news.php?subaction=showfull&id=1090745442&archive=&start_from=&ucat=1& [Stand 24.07.2004].
- [87] o.V.: *Fahrzeug-Sicherheit ist ein Wachstumsmarkt*. In: Elektronik Automotive, 3, S. 28-29, 2004.
- [88] o.V. (2004): *MB: Nachfrage nach Assistenzsystemen wächst*. In: Transporting, URL: http://www.transporting-online.de/sixcms4/sixcms/detail.php/69606?template=de_nachrichten_tp&_topnavi=34759&_zielcb=34767 [Stand 01.07.2004].

- [89] o.V. (2003): *692 000 Getötete auf Deutschlands Straßen in den letzten 50 Jahren*. Pressemitteilung des Statistischen Bundesamtes vom 04. Juni 2003. URL <http://www.destatis.de/presse/deutsch/pm2003/p2250191.htm> [Stand 04.06.2003].
- [90] Panik, F.; Böttiger, F.: *Objektive Sicherheit und subjektive Sicherheit im Wechselwirkungsbereich Fahrer-Fahrzeug, Verkehrssicherheit: Fahrerverhalten und die Bedeutung der Risikotheorien für die Sicherheit im Straßenverkehr*, Daimler Benz (Hrsg.), S. 27-39, 1981.
- [91] Patterson R.D.: *Auditory Warning Sounds in the Work Environment*. Phil. Trans. R. Soc. London B., 327, S. 485-494, 1990.
- [92] Penka, A.: *Vergleichende Untersuchung zu Fahrerassistenzsystemen mit unterschiedlichen aktiven Bedienelementen*. Dissertation, TU München, 2001.
- [93] Pentland, A., Liu, A.: *Modeling and Prediction of Human Behavior*. In: Neural Computation; 11, Massachusetts Institute of Technology; S. 229-242, 1999.
- [94] Praxenthaler, M.: *Experimentelle Untersuchung zur Ablenkungswirkung von Sekundäraufgaben während zeitkritischer Fahrsituationen*. Dissertation, Universität Regensburg, 2003.
- [95] Pohl, J.; Ekmark, J.: *Development of a Haptic Intervention System for Unintended Lane Departure*. In: Proc. SAE International, 2003.
- [96] Posner, M. I.; Nissen, M. J.; Odgen, W. C.: *Attended and unattended processing modes: The role set for spatial location*. In: Picks, H. L.; Saltzman, I. J. (Eds.): Modes of perceiving and processing information, Hilldale NJ (USA): Lawrence Erlbaum Associates, 1978.
- [97] Rasmussen, J.: *Skills, rules, knowledge; signals, signs and symbols; and other distinctions in human performance models*, IEEE transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol. SMC-13, No. 3, 1983.
- [98] Reason, J.: *Menschliches Versagen: psychologische Risikofaktoren und moderne Technologien*. Aus dem Amerikan. übersetzt von Grabowski, J., Heidelberg: Spektrum, Akad. Erl., 1994.
- [99] Reason, J.; Mycielska, K.: *Absent-Mindedness? The psychology of mental lapses and everyday errors*. N.J. Prentice-Hall (USA): Englewood Cliffs, 1982.
- [100] Recartes, M.A.; Nunes, L.M.: *Effects of distance and speed on time to arrival in an automobile: two classes of time?* In: Rothengatter, T.; Vaya, C.E. (Eds.) Traffic and Transportation psychology- Theory and Application, Amsterdam: Pergamon Press, 1997.
- [101] Riedel, H.: *Kamerasysteme im Automobil*. In: Gevatter, H.J.; Günhaupt, U. (2004): Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik. Berlin: Springer-Verlag, 2004.
- [102] Rieder, A.: *Fahrzeuge sehen – multisensorielle Fahrzeugerkennung in einem verteilten Rechnersystem für autonome Fahrzeuge*, Dissertation, Universität der Bundeswehr München, 2000.
- [103] Salvucci, D.D.; Liu, A.; Boer, E.R. (2001): *Control and monitoring during lane changes*. Paper für Vision in Vehicles, 9, unveröffentlicht, URL <http://www.mcs.drexel.edu/~salvucci/VIV01/VIV01.pdf> [Stand 01.01.2005]
- [104] Salvucci, D.D.; Liu, A.: *The Time Course of a Lane Change: Driver Control and Eye Movement Behavior*. In: Transportation Research, Part F, 5(2): 123-132, 2002.
- [105] Sato, K. et al.: *A Study on a Lane Departure Warning System using a Steering Torque as a Warning Signal*. In: Proc. of the International Symposium on Advanced Vehicle Control AVEC' 98, Nagoya, Japan, 14.-18. September 1998, Society of Automotive Engineers of Japan (JSAE), Tokio (Japan), S. 479-484, 1998.

- [106] Sauer, T.; Schwarz, A.: *Sensoren für Fahrerassistenzsysteme – Anforderungen, Analyse und Bewertung*. Beitrag anlässlich des 5. Internationalen Stuttgarter Symposiums Automotive and Engine Technology, 18. bis 20. Februar, 2003.
- [107] Scheunert, D.; Sferco, R.; Becker, H. (2002): *Unfallforschung – Wo liegen Potenziale*. Beitrag zum VDA Technischen Kongress vom 20./21. März, Stuttgart, 2002.
- [108] Schiff, W.; Oldak, R.; Shah, V.: *Aging persons' estimates of vehicular motion*. In: Psychology and Aging, 7, S. 518 – 525, 1992.
- [109] Schmitz, H.: *Adaptiver Spurverlassenswarner mit fahrerabsichts- und fahrerzustandsabhängiger Warnstrategie*. Dissertation, TH Karlsruhe, 2004.
- [110] Schreiner, F.: *Automatische Führung des Kraftfahrzeugs mit fahreradaptiven Eigenschaften*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 404., Düsseldorf: VDI-Verlag, 1999.
- [111] Schuhmann, J.: *On the use of discrete proprioceptive-tactile warning signals during manual control- The steering wheel as an active control device*, Münster: Waxmann Verlag, 1994.
- [112] Schuhmann, J.; Naab, K.: *On the effectiveness of an active steering wheel in critical driving situations – a proving ground experiment*. In: Proc. Of Conference Road Safety in Europe, VTI Rapport 380A, Part 4, S. 194-208, 1992.
- [113] Scialfa, C.T. et al.: *Age differences in judgement of vehicle velocity and distance*. In: Proceedings of the Human Factors Society 31th Annual Meeting, Human Factors and Ergonomics Society, Santa Monica (USA), S. 558-561, 1987.
- [114] Sidaway, B. et al.: *Time-to-Collision estimation in a simulated driving task*. In: Human Factors, 38, 1, S. 101-113, 1996.
- [115] Sparmann, U.: *Spurwechselforgänge auf zweispurigen BAB-Richtungsfahrbahnen*. Forschungsberichte aus dem Forschungsprogramm des Bundesministers für Verkehr und der Forschungsgesellschaft für Straßenwesen e.V., Heft 263, 1978.
- [116] Stanzel, M.: *Unfallforschung zum Zusammenwirken aktiver und passiver Sicherheit im Pkw*. Vortrag anlässlich der Tagung „Fahrerassistenzsysteme und Aktive Sicherheit“, 20. November 2002, Haus der Technik Essen, 2002.
- [117] Strohal, M.: *Pilotenfehler- und Absichtserkennung als Baustein für ein Cockpitassistenzsystem mittels eines halbautomatischen Verfahrens zur Situationsklassifikation*, Dissertation, Universität der Bundeswehr München, 1999.
- [118] Thomanek, F.: *Visuelle Erkennung und Zustandsschätzung von mehreren Straßenfahrzeugen zur autonomen Fahrzeugführung*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, 1996.
- [119] Tränkler, H.-R.: *Sensortechnik – Handbuch für Praxis und Wissenschaft*. Berlin: Springer Verlag, 1998.
- [120] Travis, K. M.: *Price sensitivity measurement technique plots product price vs. quality perceptions*. In: Marketing News, 6, 1982.
- [121] Tresilian, J.R.: *Empirical and theoretical issues in the perception of time to contact*. Journal of Experimental Psychology. In: Human Perception and Performance, 17, S. 865-876, 1991.
- [122] Utzelmann H.D., *Merkmale des Fahrverhaltens und ihre Zuordnung zu motivationalen Bedingungen*. In: Bundesanstalt für Straßenwesen (Hg.): Symposium 77. Bundesanstalt für Straßenwesen, Köln.

- [123] Vukotich, A.; Kirchner, A.: *Sensor fusion for driver-assistance-systems*. In: Elektronik im Kraftfahrzeug, Baden-Baden, 2001.
- [124] Wald, F. (2004): *Selten so gelacht*. In: Spiegel Online, URL: <http://www.spiegel.de/auto/fahrberichte/0,1518,324239,00.html> [Stand 21.10.2004].
- [125] Weilkes, M.: *Auslegung und Analyse von Fahrerassistenzsystemen mittels Simulation*. Dissertation, Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen Aachen mbH (fka), 2000.
- [126] Weiss, E.: *Untersuchung und Rekonstruktion von Ausweich- und Spurwechselvorgängen*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 96., Düsseldorf: VDI-Verlag, 1988.
- [127] Wiedemann, R.: *Simulation des Straßenverkehrsflusses*. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, Heft 8, Karlsruhe, 1974.
- [128] Willumeit, H.-P.; Jürgensohn, T.: *Fahrermodelle – ein kritischer Überblick*. In: ATZ Automobiltechnische Zeitschrift, 99, Teil 1 in 7/8, S. 424-428, Teil 2 in 9, S. 552-560, 1997.
- [129] Woods, D.D (1984): *Some results on operator performance in emergency events*. Institute of Chemical Engineers Symposium Series, 90, S. 21-31, 1984.
- [130] Wörsdörfer, K.-F.; Maurer, M.: *Fahrerassistenzsysteme zur Erhöhung der Sicherheit*. In: 5. Internationales Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, Universität Stuttgart, Stuttgart-Vaihingen, S. 653-663, 2003.
- [131] World Health Organisation (2004): Mortality by leading causes of death, age and sex (HFAMDB), URL: http://www.euro.who.int/eprise/main/WHO/InformationSources/Data/20011017_1 [Stand 01.07.2004].
- [132] Zwahlen, H. T.; Adams, C. C.; Jr. & De Bald, D. P.: Safety aspects of CRT touch panel controls in automobiles. In: Vision in Vehicles II, North Holland, S. 335-344, 1988.

