

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 Versuchsdurchführung	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).

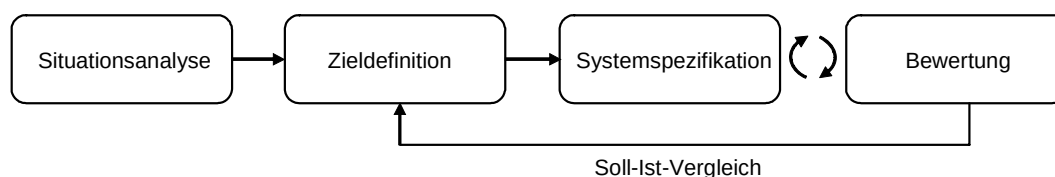


Bild 1: Problemorientierter Ansatz zur Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen

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 Entwicklungspfad 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.

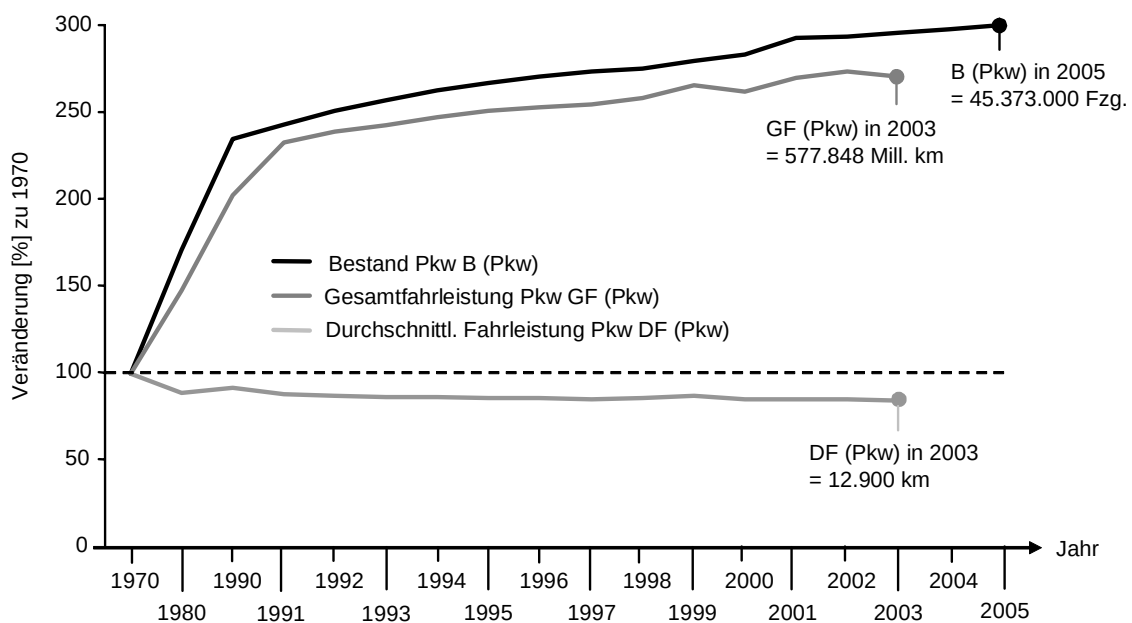


Bild 2: Relative Veränderung von Bestand, Gesamtfahrleistung und durchschnittlicher Inländer-Fahrleistung von Pkw für Deutschland bezogen auf 1970 nach Daten des Statistischen Bundesamtes

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.

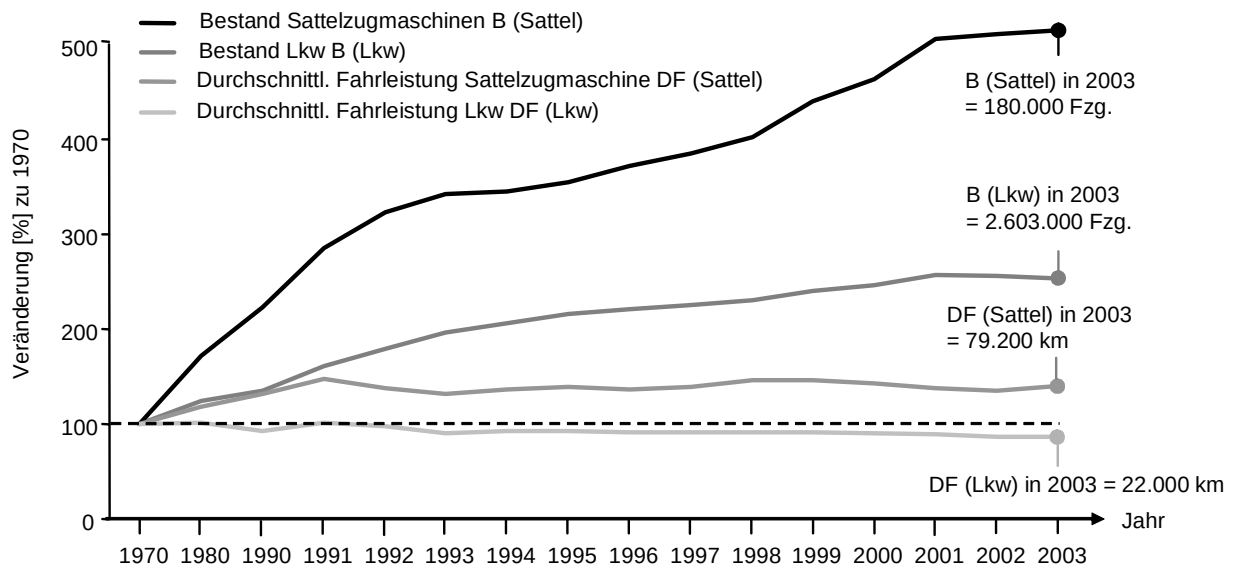


Bild 3: *Relative Veränderung von Bestand und durchschnittlicher Inländer-Fahrleistung von Lastkraftwagen und Sattelzugmaschinen für Deutschland bezogen auf 1970 nach Daten des Statistischen Bundesamtes*

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).

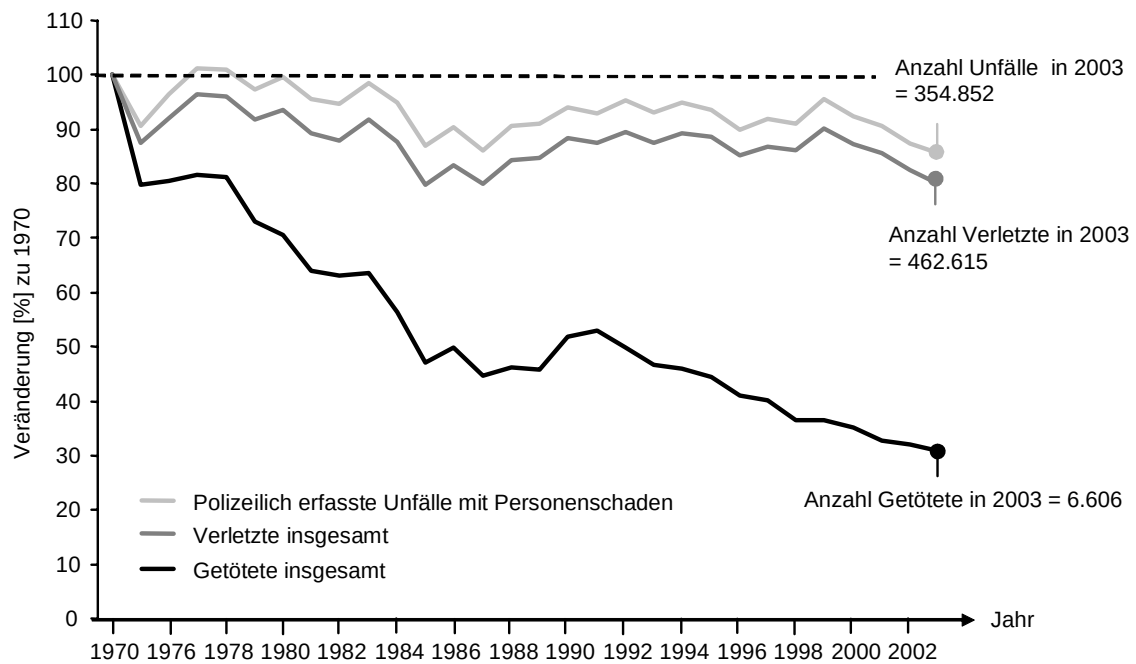


Bild 4: Relative Veränderung von polizeilich erfassten Unfällen und der darin verletzten und getöteten Personen bezogen auf 1970 nach Daten des Statistischen Bundesamtes

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.

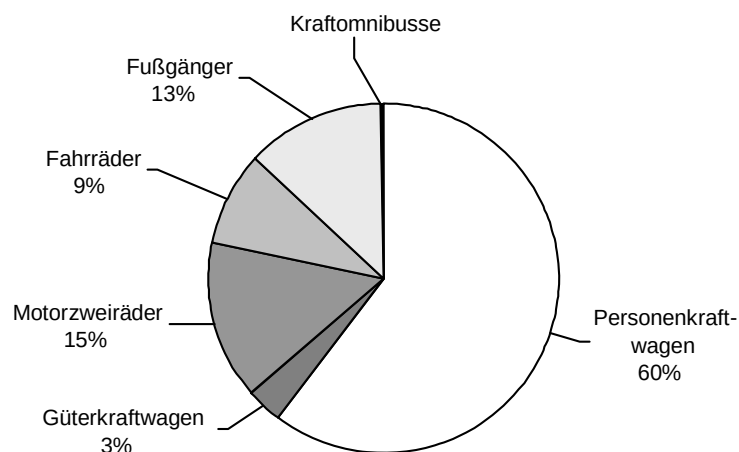


Bild 5: Getötete Personen im Jahr 2003 nach Art der Verkehrsbeteiligung nach Daten des Statistischen Bundesamtes

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

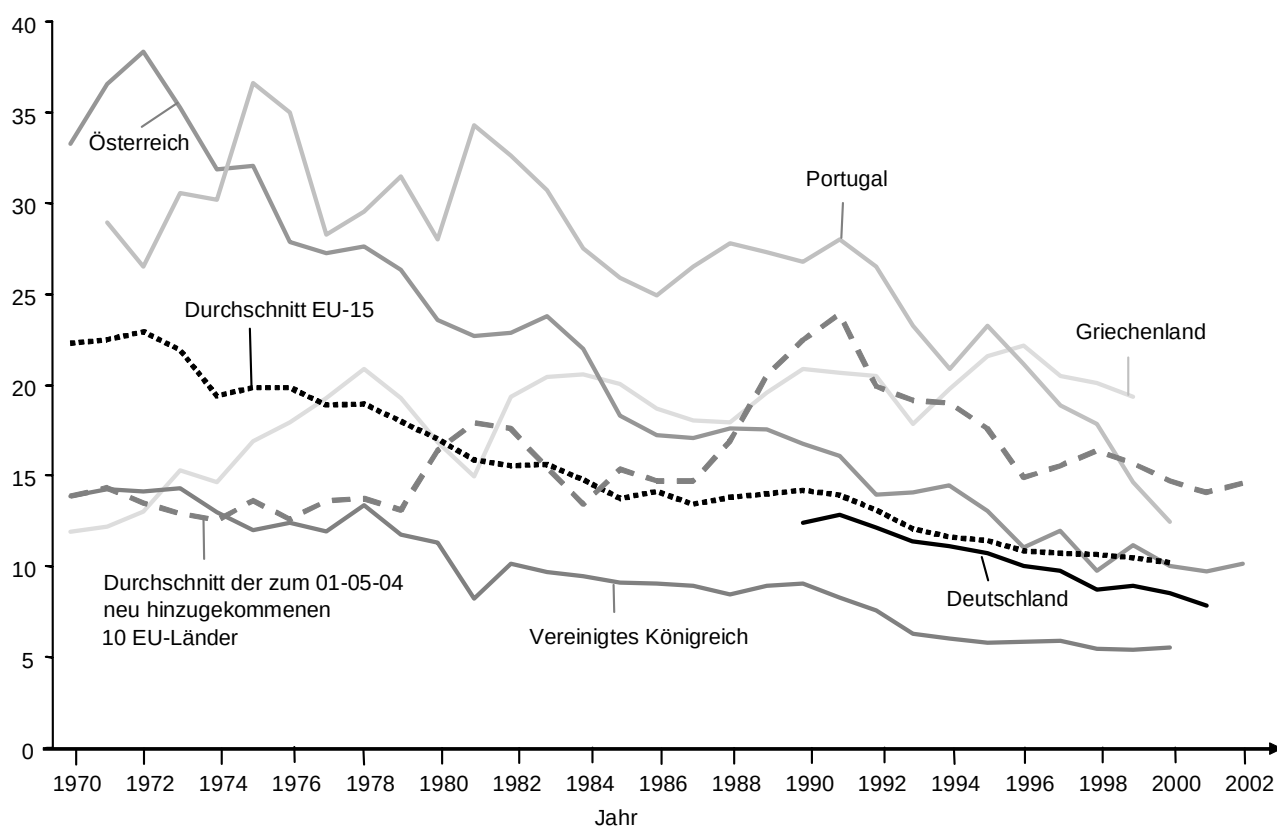


Bild 6: Mortalitätsraten aufgrund von Straßenverkehrsunfällen in ausgewählten Ländern der Europäischen Union im Vergleich zur durchschnittlichen Mortalitätsrate der EU-15-Länder und der zum Mai 2004 hinzugekommenen zehn EU-Länder

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.

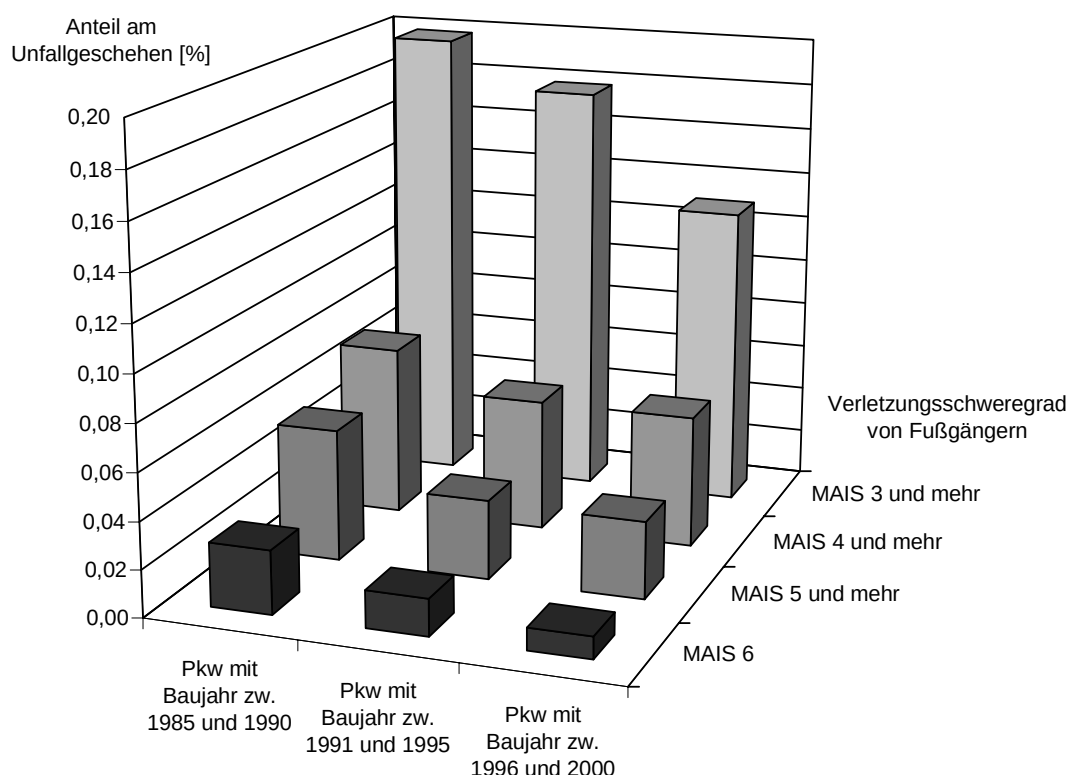


Bild 7: Eintrittswahrscheinlichkeit verschiedener Verletzungsschweregrade bei Kollisionsunfällen mit Fußgängern in Abhängigkeit des Baujahrs des beteiligten Fahrzeugs

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

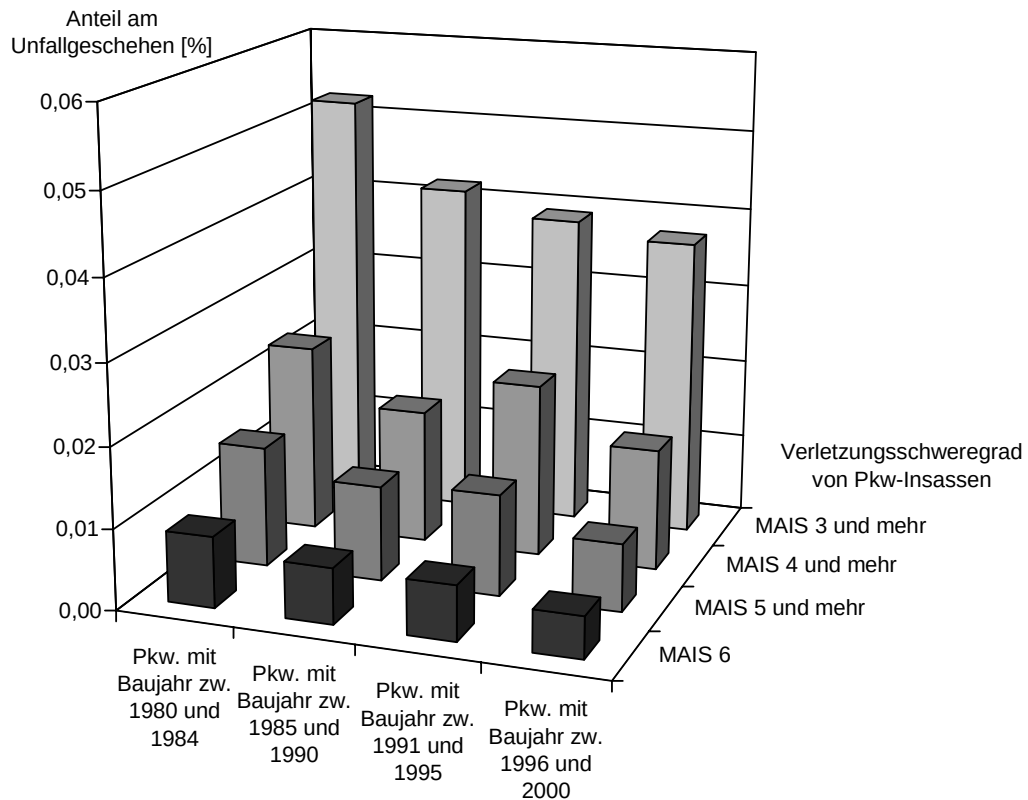


Bild 8: Eintrittswahrscheinlichkeit verschiedener Verletzungsschweregrade bei Unfällen von PKW-Insassen in Abhängigkeit des Baujahrs des beteiligten Fahrzeugs

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