

# **Videogestützte Überwachung der Fahreraufmerksamkeit und Adaption von Fahrerassistenzsystemen**

**Dissertation**

**Zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)**

**Vorgelegt der Fakultät für Informatik und Automatisierung  
der Technischen Universität Ilmenau**

von : Dipl.-Ing. Benjamin Trefflich

geboren am : 31. Dezember 1979

in : Weimar

vorgelegt am : 09. Juni 2009

verteidigt am : 05. Februar 2010

Gutachter : 1. Prof. Dr. Horst-Michael Groß, TU Ilmenau  
2. Prof. Dr. Berthold Färber, Univ. d. BW München  
3. Prof. Dr. Klaus Augsburg, TU Ilmenau



*Gewidmet all denen,  
ohne die ich nicht da wäre, wo ich heute bin...*



# Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit bei der Audi Electronics Venture GmbH im Projekt Driver Monitoring in Zusammenarbeit mit dem Fachgebiet Neuroinformatik und Kognitive Robotik der Technischen Universität Ilmenau.

Auf Seiten der Technischen Universität Ilmenau möchte ich mich bei Herrn Prof. Horst-Michael Groß für die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit sowie die lehrreichen und konstruktiven Gespräche im Laufe der Entstehung bedanken. Darüber hinaus gilt mein Dank Prof. Klaus Augsburg für die Erstellung des dritten Gutachtens.

Herrn Prof. Berthold Färber vom Institut für Arbeitswissenschaft der Universität der Bundeswehr München danke ich für die Erstellung des zweiten Gutachtens, für seine Zeit und die wertvollen Anregungen.

Des Weiteren danke ich meinem Betreuer bei der Audi Electronics Venture GmbH Herrn Dr. Stefan Mayer für das in mich gesetzte Vertrauen sowie seine ruhige strukturierte Anleitung. Weiterhin einen Dank an meine Abteilungsleiter Herrn Dr. Martin Meyer und Herrn Jörg Flerlage für ihre Unterstützung und die nötigen Freiräume.

Ferner möchte ich meinen Kollegen und zum Teil ehemaligen Kollegen bei Audi insbesondere Herrn Rainer Schichtl, Herrn Christian Reinhardt, Herrn Mehmet Terkes, Herrn Daniel Profendiener, Herrn Ph.D. Richard Altendorfer, Herrn Dr. Christian Allmann und Herrn Alexander Barke sowie Herrn Christoph Blaschke von der Universität der Bundeswehr für ihre Unterstützung bei den Versuchsreihen, die förderlichen Diskussionen und die kreative Zusammenarbeit danken. Nicht zu vergessen die Kollegen der Firma BFFT, hervorgehoben Herrn Stefan Hebauer und Herrn Günter Amler, für ihren Beitrag beim Aufbau des Versuchsfahrzeuges.

Außerdem danke ich Frau Ute Schütz von der TU Ilmenau für die Unterstützung bei der Bewältigung der bürokratischen Randerscheinungen und im Besonderen für die Terminkoordination.

Zu guter Letzt gilt mein Dank Babs, dass sie mich durch die Höhen und Tiefen bei der Erstellung der Arbeit begleitet und meine Launen geduldig ertragen hat.



# Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird ein Überblick gegeben, welche Systeme und Verfahren Aussagen über den aktuellen Aufmerksamkeitszustand des Fahrers zulassen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf monokularen kamerabasierten Fahrerbeobachtungssystemen. Es werden verschiedene Ansätze diskutiert, die es ermöglichen den visuellen Aufmerksamkeitsfokus des Fahrers auf Basis eines solchen Systems zu ermitteln sowie die besondere Bedeutung der Kopforientierung und Blickrichtung in diesem Zusammenhang hervorgehoben.

In einem ersten Schritt wird eine Bewertungsmethodik entwickelt, die es ermöglicht, kamerabasierte Fahrerbeobachtungssysteme in typischen Fahrsituationen im Hinblick auf die Messgenauigkeit der Kopforientierung sowie den erreichten Erfassungsbereich zu bewerten. Die Funktionsfähigkeit dieser Methodik wird in einer ersten Versuchsreihe unter Beweis gestellt.

In weiteren Versuchsreihen wird bestimmt, inwiefern Blickrichtung und Kopforientierung in typischen Fahrsituationen miteinander korrelieren und inwieweit alleine auf Basis der Kopforientierung Aussagen zur Fahreraufmerksamkeit getroffen werden können. Daraus werden verschiedene eigene Ansätze, wie die Kopforientierung hinsichtlich der Fahreraufmerksamkeit interpretiert werden kann, abgeleitet, umgesetzt und beurteilt.

Aufbauend auf diesen Ansätzen zur kopforientierungs-basierten Fahreraufmerksamkeitsbestimmung werden die Warnstrategien von zwei Fahrerassistenzsystemen (FAS) mit maschineller Wahrnehmung, ursprünglich nur der Fahrzeugumwelt, prototypisch an die Aufmerksamkeit des Fahrers angepasst. Bei den hierfür beispielhaft modifizierten FAS handelt es sich zum einen um einen Spurverlassenswarner (engl. LDW – Lane Departure Warning System), zum anderen um einen abstandsgesteuerten Tempomaten (engl. ACC – Adaptive Cruise Control System). Ziel dieser Adaptionen ist es, einerseits dem Fahrer im Falle von Unaufmerksamkeit mehr Reaktionszeit in einer Gefahrensituation einzuräumen. Andererseits soll die Akzeptanz des FAS gesteigert werden, in dem dessen Warnungen nur noch in kritischen Situationen, bezogen auf den Aufmerksamkeitszustand des Fahrers, ausgegeben werden (Relevanzaspekt). Die prototypischen Systemauslegungen beider FAS werden abschließend in Probandenversuchen evaluiert sowie die daraus resultierenden Ergebnisse vorgestellt und diskutiert.



# Abstract

In this dissertation approaches for estimating the driver alertness are reviewed and assessed. An overview of the current state-of-the-art is given and new approaches are presented. Here, the main focus is put on monocular driver monitoring systems that detect the orientation of the driver's head.

At a first step a prototypic measuring setup is presented allowing a comparison of different driver monitoring systems concerning the accuracy and range of the estimated orientation angles of the driver's head for typical driving scenarios. An exemplary driver monitoring system is assessed in a first series of experiments. Accuracy and range could serve as criteria for benchmarking other systems.

Further experiments were conducted in order to determine the correlation between eye gaze and head orientation and in order to determine whether driver alertness can be inferred from the head orientation only. Those experiments gave rise to several approaches for alertness estimation based on head orientation; they were prototypically implemented and evaluated.

Based on those approaches warn strategies of two driver assistance systems (DAS), namely lane departure warning (LDW) and adaptive cruise control (ACC), were modified to take into account the driver's alertness level. These modifications serve two purposes: first they should increase the available response time of the driver in a dangerous driving situation in case of inattention; second they should improve the acceptance of DAS by generating warnings only in critical driving situations when the driver is inattentive. Both DAS modifications are evaluated in a subject test; the results are presented and discussed.



# Inhalt

|          |  |          |
|----------|--|----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung .....</b>  | <b>1</b> |
| 1.1      | Motivation – Fahreraufmerksamkeitserkennung und adaptive Fahrerassistenz .....   | 1        |
| 1.2      | Zielsetzung der Arbeit.....  | 4        |
| 1.3      | Gliederung der Arbeit .....  | 5        |
| <b>2</b> | <b>Psychologische und physiologische Grundlagen .....</b>                        | <b>7</b> |
| 2.1      | Fahraufgabe .....  | 8        |
| 2.2      | Fahrerzustand.....   | 10       |
| 2.3      | Aufmerksamkeit .....   | 11       |
| 2.3.1    | Selektive Aufmerksamkeit.....  | 12       |
| 2.3.2    | Geteilte Aufmerksamkeit .....  | 13       |
| 2.3.3    | Daueraufmerksamkeit .....  | 14       |
| 2.4      | Ablenkung und Unaufmerksamkeit .....   | 15       |
| 2.5      | Situationsbewusstsein .....  | 16       |
| 2.6      | Wahrnehmungskanäle bei der Fahrzeugführung.....                                  | 18       |
| 2.6.1    | Der visuelle Sinneskanal.....  | 19       |
| 2.7      | Möglichkeiten der Fahrerzustandserkennung .....                                  | 21       |
| 2.7.1    | Direkte Verfahren der Fahrerzustandserkennung.....                               | 22       |
| 2.7.1.1  | Berührungslos erfassbare Parameter .....   | 22       |
| 2.7.1.2  | Intrusiv erfassbare Parameter .....  | 28       |
| 2.7.2    | Indirekte Verfahren - Fahrerzustandserkennung auf Basis von Fahrzeugparametern.. | 30       |
| 2.8      | Fahreraufmerksamkeit und Fahrerassistenz - Formen der Adaption.....              | 33       |
| 2.8.1    | Warnzeitpunkt.....   | 35       |
| 2.8.2    | Warnintensität.....  | 35       |
| 2.8.3    | Warnunterdrückung .....  | 36       |
| 2.8.4    | Akzeptanz .....  | 36       |
| 2.8.5    | Verhaltensadaption .....   | 37       |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>3</b> | <b>Systemanalyse – Fahrerassistenz- und Messsysteme .....</b>                       | <b>38</b> |
| 3.1      | Fahrerassistenzsysteme .....  | 38        |
| 3.1.1    | Abstandsregeltempomat – ACC.....  | 40        |
| 3.1.1.1  | Funktionsweise .....  | 40        |
| 3.1.1.2  | Take Over Request – TOR.....  | 42        |
| 3.1.2    | Spurverlassenswarner – LDW.....   | 45        |
| 3.1.2.1  | Funktionsweise .....  | 45        |
| 3.1.2.2  | Warnmodi.....   | 46        |
| 3.2      | Stand der Technik – Aufmerksamkeitsüberwachung .....                                | 48        |
| 3.2.1    | Das Pre-Crash Safety System der Firma Lexus.....                                    | 49        |
| 3.3      | Prototypen- und Messsysteme für die Versuchsdurchführung .....                      | 52        |
| 3.3.1    | Kamerasysteme .....   | 52        |
| 3.3.1.1  | Der Driver State Sensor (DSS) – ein Monokamerasystem.....                           | 52        |
| 3.3.1.2  | Das Face Lab System – ein Mehrkamerasystem.....                                     | 53        |
| 3.3.1.3  | Funktionsweise .....  | 54        |
| 3.3.2    | Referenzsenorik (Laser Tracker).....  | 60        |
| 3.3.3    | Versuchsfahrzeug .....  | 61        |
| <b>4</b> | <b>Eine Methode zur Evaluierung kamerabasierter Fahrerbeobachtungssysteme .....</b> | <b>63</b> |
| 4.1      | Messprinzip .....   | 63        |
| 4.2      | Versuchsaufbau und Durchführung.....  | 68        |
| 4.3      | Genauigkeit und Erfassungsbereich – Ergebnisse .....                                | 70        |
| 4.4      | Fazit.....  | 77        |
| <b>5</b> | <b>Kopforientierung und Blickverhalten in typischen Fahrsituationen .....</b>       | <b>78</b> |
| 5.1      | Ziele der Studie.....   | 78        |
| 5.2      | Versuchsaufbau und Durchführung.....  | 79        |
| 5.3      | Datenaufbereitung und Ergebnisse .....  | 80        |
| 5.3.1    | Kopforientierung unter Aufmerksamkeit.....  | 81        |
| 5.3.2    | Kopforientierung als Maß für Ablenkung.....   | 85        |
| 5.3.2.1  | Regionenbasierte Klassifikation.....  | 85        |

|          |  |             |
|----------|--|-------------|
| 5.3.2.2  | Berücksichtigung der Abwendungsdauer.....                                      | 87          |
| 5.4      | Fazit.....   | 90          |
| <b>6</b> | <b>Ermittlung der Fahreraufmerksamkeit anhand der Kopforientierung .....</b>   | <b>91</b>   |
| 6.1      | Statische Aufmerksamkeitsregion .....  | 91          |
| 6.1.1    | Funktionsweise .....   | 92          |
| 6.1.2    | Bewertung .....  | 94          |
| 6.2      | Dynamische Aufmerksamkeitsregion .....   | 96          |
| 6.2.1    | Funktionsweise .....   | 97          |
| 6.2.2    | Bewertung .....  | 101         |
| <b>7</b> | <b>Adaption von FAS hinsichtlich veränderlicher Fahreraufmerksamkeit .....</b> | <b>103</b>  |
| 7.1      | Fahreraufmerksamkeitsadaptive Übernahmeaufforderung eines ACC-Systems.....     | 103         |
| 7.1.1    | Funktionsweise .....   | 104         |
| 7.1.2    | Bewertung der Funktionalität .....   | 109         |
| 7.1.2.1  | Aufbau der Versuchsreihe .....   | 111         |
| 7.1.2.2  | Versuchsdurchführung .....   | 113         |
| 7.1.2.3  | Ergebnisse und Diskussion .....  | 115         |
| 7.2      | Fahreraufmerksamkeitsadaptives Warnkonzept eines LDW-Systems .....             | 118         |
| 7.2.1    | Funktionsweise .....   | 119         |
| 7.2.2    | Bewertung der Funktionalität .....   | 122         |
| 7.2.2.1  | Aufbau der Versuchsreihe .....   | 123         |
| 7.2.2.2  | Versuchsdurchführung .....   | 125         |
| 7.2.2.3  | Ergebnisse und Diskussion .....  | 127         |
| 7.3      | Fazit.....   | 134         |
| <b>8</b> | <b>Zusammenfassung, Gesamtbewertung und Ausblick.....</b>                      | <b>136</b>  |
|          | <b>Literaturverzeichnis .....</b>  | <b>i</b>    |
|          | <b>Thesen zur Dissertation .....</b>   | <b>xiii</b> |
|          | <b>Erklärung.....</b>  | <b>xvi</b>  |



# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation – Fahreraufmerksamkeitserkennung und adaptive Fahrerassistenz

Die Unfallzahlen im deutschen Straßenverkehr sind in den letzten 15 Jahren stetig rückläufig. So ist die Zahl der von der Polizei erfassten Unfälle in diesem Zeitraum um 3,3% gesunken. Die Zahl der Unfälle mit Personenschaden ging dabei um 15%, die der Verletzten um 16% und die Zahl der Unfalltoten um 55% zurück. Das Jahr 2006 markiert einen erneuten historischen Tiefststand bei der Anzahl der Verkehrstoten in Deutschland. Dennoch kamen in diesem Jahr immer noch 5091 Menschen auf Deutschlands Straßen ums Leben. Dies entspricht im Durchschnitt 14 Verkehrstoten pro Tag (Statistisches Bundesamt, 2006).

Die Europäische Union hat das ehrgeizige Ziel definiert, die Anzahl der Verkehrstoten noch einmal deutlich zu verringern. Vorgabe ist dabei, die Zahl der auf europäischen Straßen tödlich verunglückten Personen, ausgehend vom Jahr 2000, binnen 10 Jahren zu halbieren (Focus Online, 2007).

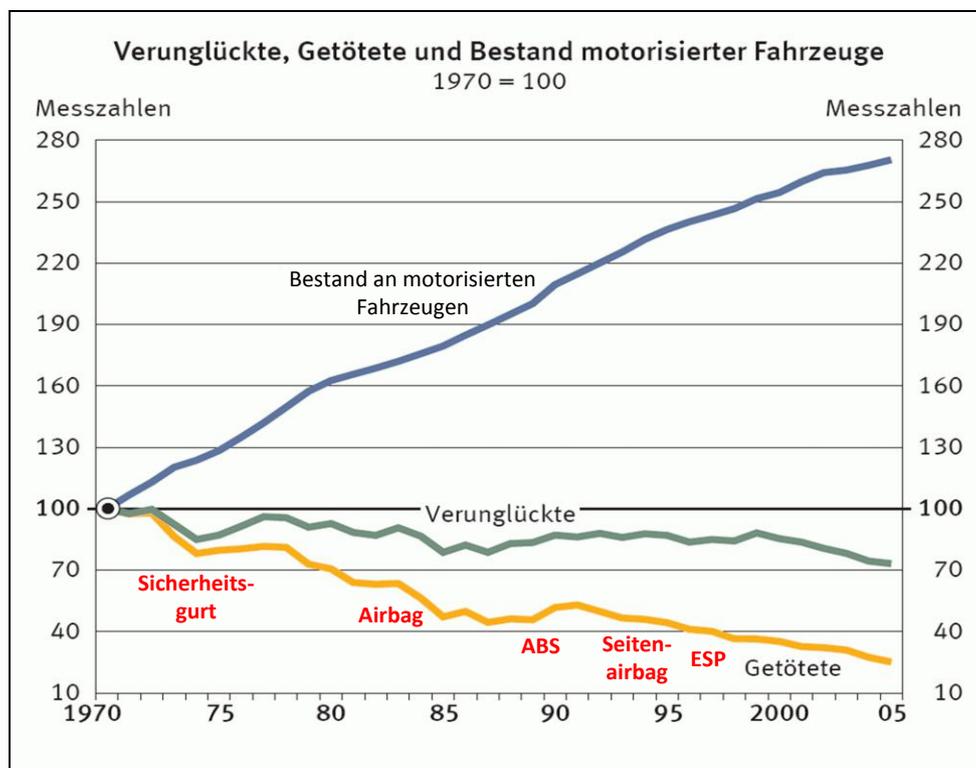


Abbildung 1.1: Entwicklung der im deutschen Straßenverkehr getöteten Personen von 1970 bis 2005; Markiert sind die wichtigsten Innovationen hinsichtlich der Fahrzeugsicherheit (Statistisches Bundesamt, 2006)

Betrachtet man die Unfallstatistiken der letzten 35 Jahre und stellt diesen wesentliche Innovationen im Straßenverkehrsgeschehen sowie des Automobilbaus gegenüber, fällt auf, dass neben der stetigen Verbesserung der Verkehrsinfrastruktur und restriktiverer Verkehrsregeln, die Einführung passiver Sicherheitssysteme wie Gurt oder Airbag einen wesentlichen Beitrag zur Reduzierung der Unfallzahlen leisten (vgl. Abbildung 1.1).

Der Nutzen solcher passiver Sicherheitssysteme ist jedoch weitgehend ausgereizt und kommt außerdem erst im Falle eines Unfalles zum Tragen (Algermissel, 2008). Fahrerassistenzsysteme (FAS), die selbstständig in die Fahrdynamik eingreifen und damit aktiv bei der Unfallvermeidung unterstützen, gehören darüber hinaus in modernen Kraftfahrzeugen bereits heute vielfach zur Serienausstattung und wirken sich noch einmal positiv auf die Reduzierung der Unfallzahlen aus. Beispiele für solche FAS sind das Anti-Blockier-System (ABS), das heute in nahezu allen Neufahrzeugen verbaut ist oder das Elektronische Stabilitätsprogramm (ESP), welches bei gut zwei Drittel aller in der Bundesrepublik Deutschland neu zugelassen Fahrzeuge Verwendung findet (Deutscher Verkehrssicherheitsrat e.V., 2006).

Ein weiteres Sicherheitsplus wurde in den letzten Jahren durch FAS mit maschineller Wahrnehmung der Fahrzeugumwelt erreicht. Beispielhaft genannt sei hierfür der Spurverlassenswarner (engl. LDW - Lane Departure Warning System), der den Fahrer warnt, bevor dieser unbeabsichtigt eine Spurmarkierung überfährt, oder der Spurwechselassistent (engl. BSD – Blind Spot Detection System), der den toten Winkel hinter einem Fahrzeug überwacht und damit bei einem Spurwechsel unterstützt (Geißler, 2008). Denn um Autos noch sicherer zu machen, muss „das Augenmerk [...] auf der Verhinderung von Unfällen liegen, nicht nur auf der Linderung der Folgen“ (Algermissel, 2008).

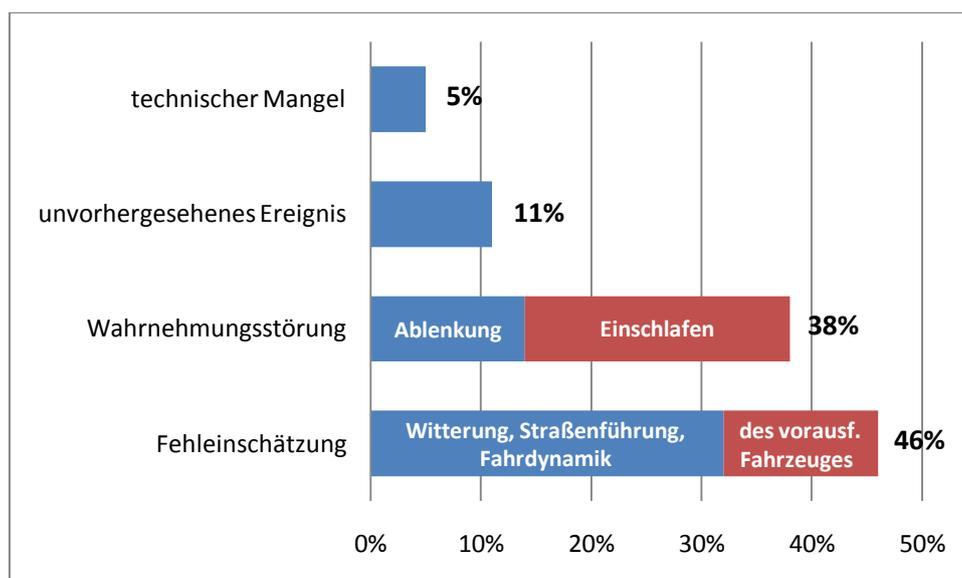
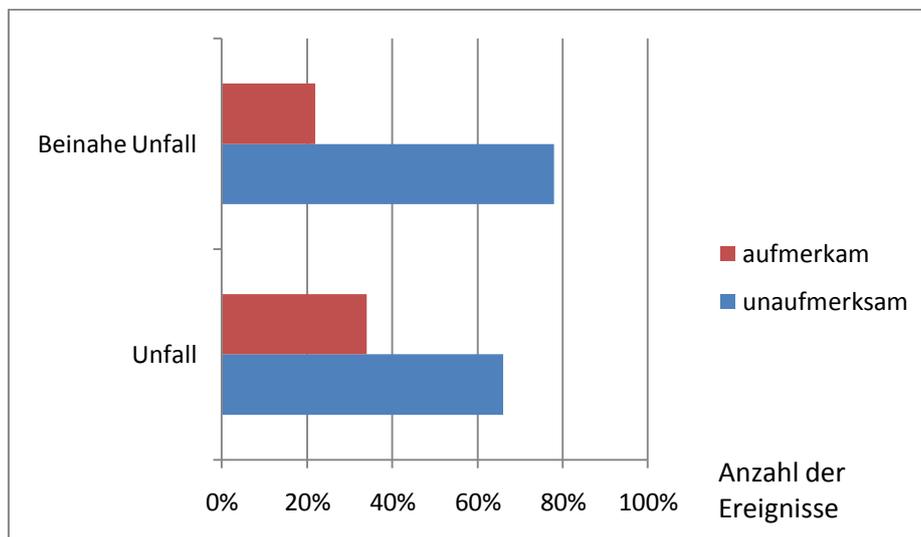


Abbildung 1.2: Unfallauslösende Ereignisse auf Bundesautobahnen mit Getöteten (Hell, 2004)

Dafür sind die letzten zwei Sekunden vor einem potentiellen Crash ausschlaggebend. In dieser Zeitspanne wird bei aktuellen Assistenzsystemen mit maschineller Wahrnehmung versucht, ein möglichst umfassendes Bild von den Geschehnissen in der Fahrzeugumwelt zu erlangen. „Der Schwachpunkt bleibt [jedoch weiterhin] der Mensch“ (Algermissel, 2008). Bei etwa 94% aller Unfälle im deutschen Straßenverkehr ist die Hauptunfallursache menschliches Versagen, Fehleinschätzungen oder Fehlverhalten (Deutscher Verkehrssicherheitsrat e.V., 2006).

Wie Abbildung 1.2 dahingehend entnommen werden kann, sind 38% aller Unfälle mit Todesfolge auf deutschen Bundesautobahnen Wahrnehmungsstörungen des Fahrzeugführers zuzuschreiben. Im Detail setzt sich dieser zweitgrößte Anteil in der deutschen Unfallstatistik zusammen aus 24% tödlichen Verkehrsunfällen verursacht durch Sekundenschlaf und 14% verursacht durch Ablenkung des Fahrers vom Verkehrsgeschehen.



**Abbildung 1.3: Der Einfluss von Ablenkung auf das Unfall- bzw. beinahe Unfallrisiko (NHTSA, 2006)**

Auch Statistiken aus den USA weisen auf einen engen Zusammenhang von Ablenkung und dem Auftreten einer kritischen Verkehrssituation hin, so zum Beispiel auch die 100-Car-Study (NHTSA, 2006). Aus dieser geht hervor, dass das Unfall- bzw. beinahe Unfallrisiko bei Ablenkung, in dem Fall gemessen durch Blickabwendung vom vorausfahrenden Verkehr, dramatisch zunimmt (Abbildung 1.3).

Anhand der Summe dieser Erkenntnisse erscheint es nun sinnvoll, Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung zu entwickeln, die die Fahreraufmerksamkeit in ihren Regelstrategien mitberücksichtigen bzw. Warnkonzepte von bereits existierenden FAS dahingehend anzupassen. Erste Systeme mit diesem Anspruch sind bereits seit kurzem von namhaften Automobilherstellern auf dem europäischen Markt verfügbar (vgl. Kapitel 3.2 „Stand der Technik – Aufmerksamkeits-

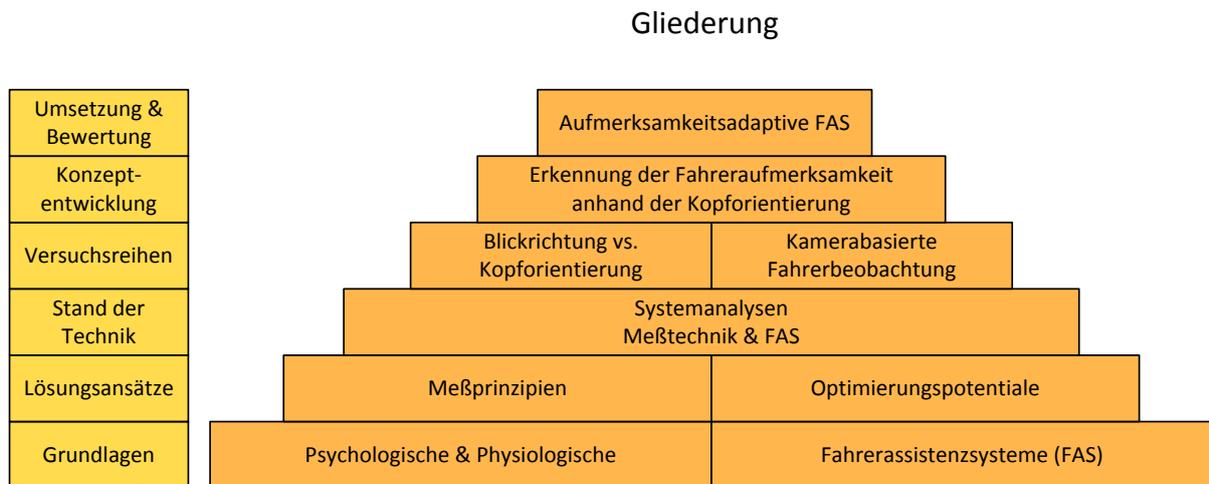
überwachung“) oder ihre Einführung in naher Zukunft angekündigt. Einen weiteren Beitrag zur Umsetzung dieses Ansatzes und damit für die Verbesserung der Verkehrssicherheit liefert die vorliegende Arbeit.

## **1.2 Zielsetzung der Arbeit**

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es zu untersuchen, inwieweit mit Hilfe eines kamerabasierten Fahrerbeobachtungssystems Aussagen zur Aufmerksamkeit des Fahrers in typischen Fahrsituationen getroffen werden können. Desweiteren sollen die Verbesserungspotentiale von Fahrerassistenzsystemen durch die Berücksichtigung der Fahreraufmerksamkeit innerhalb ihrer Warnkonzepte am Beispiel eines Abstandsregeltempomaten (ACC) sowie eines Spurverlassenswarners (LDW) aufgezeigt und diskutiert werden. Dafür ist es zum Einen erforderlich, Algorithmen zur Bestimmung der Fahreraufmerksamkeit auf Basis eines monovideobasierten Driver Monitoring Systems zu entwickeln und diese hinsichtlich ihrer Eignung im Automotive Umfeld zu beurteilen. Zum Anderen sind die Warnstrategien der beiden genannten Assistenzsysteme adaptiv im Hinblick auf eine veränderliche Fahreraufmerksamkeit auszulegen, diese Konzepte prototypisch in einem Versuchsfahrzeug zu implementieren und durch Probandenstudien zu evaluieren.

Voraussetzung dafür ist eine detaillierte Betrachtung der Begriffe Aufmerksamkeit und Ablenkung anhand psychologischer und physiologischer Gesichtspunkte in Bezug auf die Erledigung der Fahraufgabe. Weiter soll ein Überblick über verschiedene Ansätze zur Bestimmung des Fahrerzustandes gegeben sowie auf die Möglichkeiten und Grenzen einer videobasierten Fahreraufmerksamkeitserkennung eingegangen werden.

## 1.3 Gliederung der Arbeit



In **Kapitel 2** wird auf die psychologischen und physiologischen Aspekte der Fahraufgaben und des Fahrerzustandes sowie der Fahreraufmerksamkeit, -unaufmerksamkeit und -ablenkung eingegangen. Die Rolle der verschiedenen menschlichen Sinneskanäle bei der Erledigung der Fahraufgaben wird erläutert und die besondere Bedeutung des visuellen Kanals herausgestellt. Anschließend wird eine Gliederung verschiedener Verfahren zur Erkennung des Fahrerzustandes vorgenommen, die unterschiedlichen Ansätze kurz erläutert und auf die videobasierte Fahrerbeobachtung detailliert eingegangen. Zum Ende des Kapitels werden die möglichen Adaptionenformen von Fahrerassistenzsystemen im Hinblick auf die veränderliche Fahreraufmerksamkeit diskutiert.

Zu Beginn von **Kapitel 3** wird ein kurzer Überblick über das weite Feld von Fahrerassistenzsystemen gegeben und deren verschiedene Ausprägungsformen im Bezug auf die Fahreraufmerksamkeit erläutert. Im Weiteren werden der Aufbau und die Funktionsweise eines Abstandsregeltempomaten (ACC) sowie eines Spurverlassenswarners (LDW) erläutert. Daran schließt sich eine kurze Zusammenfassung des aktuellen Standes der Technik im Hinblick auf die Erkennung der Aufmerksamkeit sowie eine Systemanalyse des Pre-Crash Safety Systems der Firma Lexus an, dem ersten und bisher einzigen serienmäßig verfügbaren Assistenzsystem mit einer Fahrerbeobachtungskamera. Darauf folgt die Vorstellung der beiden im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Fahrerbeobachtungskamerasysteme. Im letzten Teil des Kapitels wird der Laser Tracker, welcher im Rahmen der Versuchsreihe des folgenden Kapitels 4 als Referenzsensor Verwendung fand, beschrieben sowie der Aufbau des bei allen praktischen Erprobungen und Probandenstudien zum Einsatz gekommenen Versuchsfahrzeugs dargelegt.

Inhalt von **Kapitel 4** ist die Diskussion einer im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Methodik zur Evaluierung kamerabasierter Fahrerbeobachtungssysteme im Hinblick auf deren Genauigkeit und Erfassungsbereich. Dabei wird das zugrundeliegende Messprinzip erläutert, die Funktionsfähigkeit in einer ersten Versuchsreihe unter Beweis gestellt und die daraus resultierenden Ergebnisse präsentiert.

**Kapitel 5** beinhaltet die Beschreibung und die Ergebnisse einer weiteren Probandenstudie. Gegenstand dieser Studie war es zu untersuchen, inwieweit Kopforientierung und Blickrichtung in typischen Fahrsituationen zusammenhängen. Die Relevanz interindividueller Unterschiede sowie Divergenzen aufgrund verschiedener Streckentypen werden dabei im Hinblick auf eine Fahreraufmerksamkeitsbestimmung basierend alleine auf der Kopforientierung betrachtet.

In **Kapitel 6** werden zwei verschiedene Ansätze zur Bestimmung der Fahreraufmerksamkeit bzw. zur Detektion von Ablenkung auf Basis der kamerabasiert ermittelten Kopforientierung vorgestellt und diskutiert. Grundlage dafür bilden die Versuchsreihen in **Kapitel 4** und **5** sowie die Literaturanalyse in **Kapitel 2**.

Schwerpunkt von **Kapitel 7** bilden die Adaptionenmöglichkeiten der Warnstrategien eines ACC- und eines LDW-Systems an die Fahreraufmerksamkeit. Zur Ermittlung der Aufmerksamkeit wird dabei auf die in **Kapitel 6** vorgestellten Ansätze zurückgegriffen. Aufbauend darauf werden die jeweiligen Adaptionenvarianten der Warnalgorithmen erläutert. Zur Bewertung der Funktionalität werden mit beiden adaptierten Systemen Probandenstudien durchgeführt. Deren Aufbau und Ergebnisse werden anschließend präsentiert und diskutiert.

Die Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse der vorliegenden Arbeit, eine abschließende Diskussion sowie ein Ausblick und Anregungen für weitere wissenschaftliche Arbeiten, sind Gegenstand des **Kapitels 8**.

## 2 Psychologische und physiologische Grundlagen

Ein zentraler Begriff der Aufgabenstellung dieser Arbeit ist die videogestützte Fahreraufmerksamkeitsüberwachung. Aber was verbirgt sich hinter dem Begriff Aufmerksamkeit im Zusammenhang mit dem Fahren eines Fahrzeuges? Wie kann Aufmerksamkeit definiert werden und anhand welcher Parameter ist sie innerhalb eines Fahrzeuges während der Fahrt videobasiert bestimmbar? Diesen Fragestellungen soll im ersten Teil dieses Kapitels nachgegangen werden. Dafür werden eingangs die verschiedenen Aspekte der Aufgaben eines Fahrers beim Fahren eines Fahrzeuges charakterisiert. Der Begriff Fahreraufmerksamkeit wird anschließend, ausgehend von der allgemeineren Definition des Fahrerzustandes, erläutert und die unterschiedlichen Facetten und psychologischen Gesichtspunkte dargelegt. Eng verbunden mit der Aufmerksamkeit ist der Wahrnehmungsprozess. Deshalb wird im zweiten Teil des Kapitels auf die menschlichen Wahrnehmungskanäle und ihre Bedeutung in Zusammenhang mit der Fahraufgabe eingegangen. Nur die Reize, die über die Sinneskanäle aufgenommen werden, können überhaupt verarbeitet und somit wahrgenommen werden. Videobasierte Fahrerbeobachtungssensorik liefert im Wesentlichen Informationen über den visuellen Sinneskanal. Diesem fällt beim Fahren eines Fahrzeuges eine große Bedeutung zu. Allerdings existieren neben Kamerasystemen auch andere Ansätze um Informationen über den aktuellen Fahrerzustand zu erlangen. Über die unterschiedlichen Messverfahren wird im dritten Teil dieses Kapitels ein Überblick gegeben und die videobasiert bestimmbar Parameter werden erörtert. Im letzten Teil des Kapitels wird auf einen weiteren zentralen Punkt der dieser Arbeit zugrunde liegenden Fragestellung eingegangen und die verschiedenen Adaptionmöglichkeiten von Assistenzsystemen im Hinblick auf die Fahreraufmerksamkeit erläutert.

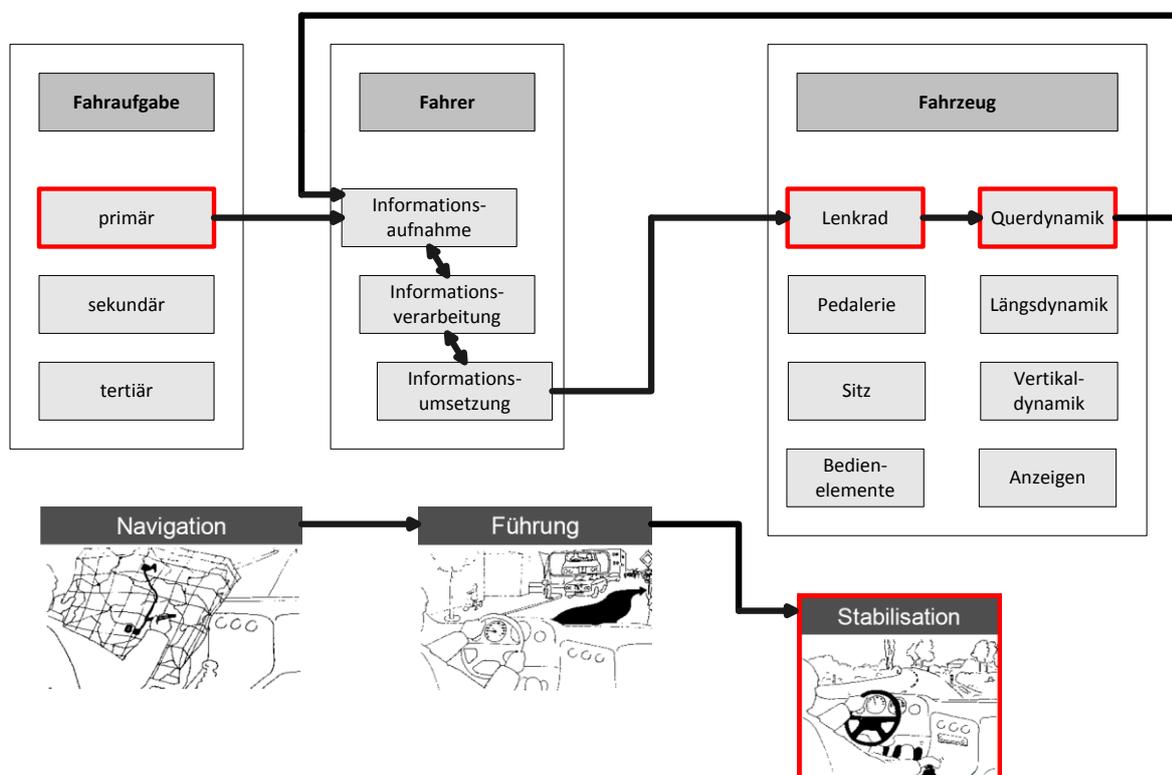
## 2.1 Fahraufgabe

Die Aufgaben, die der Fahrer bei der Fahrzeugführung zu bewältigen hat, lassen sich wie folgt unterteilen:

|   |   |
|---|---|
| <b>Primäre Aufgabe:</b><br>Halten des Fahrzeugs auf Kurs                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Navigation</li> <li>- Bahnführung</li> <li>- Stabilisierung</li> </ul>   |
| <b>Sekundäre Aufgaben:</b><br>Tätigkeiten in Abhängigkeit von Fahranforderungen | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Aktion (Blinken, Hupen)</li> <li>- Reaktion (Auf- und Abblenden, Betätigung des Scheibenwischer)</li> </ul>                      |
| <b>Tertiäre Aufgaben:</b><br>Tätigkeiten die nicht mit dem Fahren zu tun haben  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Komfortverbesserung (Klimaanlage, Sitzeinstellung, Radio ...)</li> <li>- Kommunikation (Radio, Telefon, Internet ...)</li> </ul> |

**Tabelle 2.1: Unterteilung der Fahraufgaben nach Bubb (2003)**

Dabei umfasst die primäre Fahraufgabe alle Tätigkeiten, die auf das Halten des Fahrzeugs auf der Straße abzielen. Sie kann noch einmal in die drei Ebenen Navigation, Bahnführung und Stabilisation des Fahrzeuges unterteilt werden (Donges (1978), Wolf (2000)). Unter der Navigationsaufgabe versteht man dabei das Bestimmen des Fahrzieles, sowie der geplanten Fahrzeit zu Beginn einer Fahrt.



**Abbildung 2.1: Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis in Anlehnung an Wolf (2000)**

Während der Fahrt muss abhängig von der aktuellen Verkehrssituation der momentane Kurs, die Geschwindigkeit und die Fahrspur gewählt und gehalten werden. Dies ist unter dem Begriff der Bahnführungsaufgabe zusammengefasst. Die Stabilisierungsaufgabe beinhaltet schließlich Aktionen wie das Lenken und die Betätigung der Pedalerie zum Beschleunigen oder Bremsen des Fahrzeugs unter der Prämisse, den gewählten Kurs sowie die Geschwindigkeit einzuhalten.

Die sekundären Fahraufgaben entstehen aus der jeweiligen Verkehrs- und Umweltsituation, unter denen die Fahrt stattfindet, lassen sich aber nicht unmittelbar der Fahrzeugführung zuordnen. Sie lassen sich weiter unterteilen in Aktionen und Reaktionen. Verkehrssituationsbedingte Reaktionen sind zum Beispiel das Betätigen des Scheibenwischers oder das Abblenden, um auf einsetzenden Regen oder ein entgegenkommendes Fahrzeug zu reagieren. Dagegen sind beispielsweise Hupen und Blinken Aktionen, die der Information anderer Verkehrsteilnehmer dienen.

Tertiäre Aufgaben stehen nicht im Zusammenhang mit der eigentlichen Aufgabe Fahrzeugführung sondern sind Nebentätigkeiten. Sie dienen lediglich der Verbesserung des Fahrkomforts oder der Kommunikation. Ihnen ist die Bedienung von Infotainmentgeräten, wie z.B. dem Radiosystem sowie die Benutzung eines Mobiltelefons während der Fahrt, zuzuordnen.

## 2.2 Fahrerzustand

Alle relevanten Faktoren, die den Zustand eines Fahrers bei der Ausführung der eigentlichen Aufgabe, dem Führen eines Kraftfahrzeuges (vgl. Abschnitt 2.1) charakterisieren, lassen sich wie folgt gliedern:

|  |   |
|--|---|
| <p><i>Nicht oder nur langfristig (Monate, Jahre) veränderliche Faktoren des Fahrerzustandes (überdauernde Faktoren):</i></p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Konstitution</li> <li>- Fahrerfahrung</li> <li>- Fahrkönnen</li> <li>- Belastbarkeit</li> <li>- Persönlichkeit</li> <li>- Sensorische Fähigkeiten oder Behinderung</li> <li>- Motorische Fähigkeiten oder Behinderung</li> <li>- ...</li> </ul>  |
| <p><i>Mittelfristig (Tage, Stunden) veränderliche Faktoren (fahrtraumenbezogene Faktoren):</i></p>                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ermüdung</li> <li>- Tagesrhythmus</li> <li>- Alkohol/Drogeneinfluss</li> <li>- Individuelle Strategie (z.B. möglichst schnell vorwärtskommen vs. belastungsminimiert fahren)</li> <li>- Momentane gesundheitsbedingte Einschränkungen</li> <li>- ...</li> </ul>  |
| <p><i>Kurzfristige (Minuten, Sekunden) veränderliche Faktoren:</i></p>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Gerichtete Aufmerksamkeit (visuell, akustisch)</li> <li>- Vigilanz (Wachsamkeit bzw. ungerichtete Aufmerksamkeit)</li> <li>- Beanspruchung</li> <li>- Anstrengung</li> <li>- Aktivierung (Aktiviertheit)</li> <li>- Absicht (hier vor allem die geplante nächste Fahrmanöverfolge)</li> <li>- Situationsbewusstsein</li> <li>- Emotionen</li> <li>- ...</li> </ul> |

**Tabelle 2.2: Unterteilung des Fahrerzustands nach Kopf (2005)**

Wird vom Fahrerzustand gesprochen, tauchen häufig die Begriffe Wahrnehmung, Aufmerksamkeit, Unaufmerksamkeit, Ablenkung etc. auf. Diese für die vorliegende Arbeit zentralen Begriffe näher zu erläutern und gegebenenfalls von einander abzugrenzen ist Gegenstand der folgenden Teilkapitel.

## 2.3 Aufmerksamkeit

*„Jeder weiß, was Aufmerksamkeit ist. Es ist die Besitzergreifung des Geistes, in deutlicher und lebhafter Weise, von einem von anscheinend mehreren gleichzeitig möglichen Objekten oder Gedankengängen. Zuwendung und Konzentration des Bewusstseins gehört zu ihren Voraussetzungen. Sie impliziert Vernachlässigung einiger Dinge, um andere besser verarbeiten zu können [...].“* (James, 1890)

Der zentrale Punkt der historischen Definition von Aufmerksamkeit nach James (1890) ist die Selektion von relevanten Informationen aus der Vielzahl aller Informationen, die ständig über alle Sinneskanäle des Menschen aufgenommen werden. Dies geschieht zu Lasten der anderen als weniger relevant eingestuften Eindrücke und Gedanken. In der nachfolgenden Tabelle ist dies unter dem Begriff der selektiven Aufmerksamkeit zusammengefasst. Zudem werden weitere Ausprägungsformen der Aufmerksamkeit definiert.

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| <b>Selektive Aufmerksamkeit:</b> | Selektion von bestimmten Dingen zu Ungunsten anderer Funktionen, damit das Informationsaufnahmesystem nicht überlastet wird. (als irrelevant eingestufte Sachverhalte werden dabei ausgeblendet)   |
| <b>Geteilte Aufmerksamkeit:</b>  | Fähigkeit zur schnellen und parallelen, sowohl kontrollierten als auch automatisierten Informationsaufnahme und Organisation von Mehrfachaufgaben durch paralleles Erledigen oder durch Anwendung sequentieller Strategien (task-switching). |
| <b>Daueraufmerksamkeit:</b>      | Aufrechterhaltung der Aufmerksamkeit über einen längeren Zeitraum in monotonen Situationen, mit dem Ziel auf selten auftretende und zufällige Reize angemessen reagieren zu können (Vigilanz).   |

**Tabelle 2.3: Formen der Aufmerksamkeit nach Krüger (2007) und Mieg (2006)**

Nach Posner und Rafal (1987) liegt dem Prozess der Aufmerksamkeit ein allgemeines Aktivierungsniveau zugrunde. Die Aktivierung (engl. alertness) ist unterteilbar in eine tonische und in eine phasische Komponente. Die Autoren erläutern, dass die tonische Aktivierung gleichbedeutend mit der Wachheit eines Individuums ist und nicht willentlich kontrolliert werden kann (Posner, 1987).

Sie ist lediglich abhängig vom circadianen Rhythmus<sup>1</sup>. Die phasische Aktivierung beschreibt eine Aktivitätssteigerung im Allgemeinen als Reaktion auf einen Reiz. Durch die phasische Komponente ist es einem Individuum möglich, kurzfristig die tonische Aktivierung zu erhöhen (Krüger, 2007). Das allgemeine Aktivierungsniveau beschreibt die Grenzen, in denen eine Aufmerksamkeitsanpassung möglich ist.

### **2.3.1 Selektive Aufmerksamkeit**

Laut der Studien von Allport (1987) und Neumann (1987) erfolgt eine Selektion von Informationen stets hinsichtlich einer bestimmten zielgerichteten Handlung. Aufmerksamkeit steht dabei nicht alleine sondern wird immer im Kontext einer bestimmten Handlung verstanden. Es wird davon ausgegangen, dass eine Fokussierung auf handlungsbezogene Reize stattfindet. Während nicht-handlungsbezogene Reize gehemmt werden (Neumann, 1987).

Bringt man nun diese Definition mit der Einteilung der Fahraufgaben in Kapitel 2.1 in Verbindung, so muss unterschieden werden, welcher Teil der Aufmerksamkeit für die primäre und sekundäre Fahraufgabe zur Verfügung steht und welcher auf die tertiären Handlungen, die nicht für die sichere Fahrzeugführung relevant sind, gerichtet ist. Der tertiäre Anteil ist als kritische Ablenkung einzustufen, wenn dadurch die Aufgabe, das Fahrzeug sicher durch den Straßenverkehr zu steuern, beeinträchtigt wird.

Im Bezug auf visuelle selektive Aufmerksamkeit taucht in der Literatur häufig der Begriff der „Spotlight Metapher“ auf (Posner, 1980). Spotlight deshalb, weil davon ausgegangen wird, dass Aufmerksamkeit sich ähnlich einem Scheinwerfer durch den Raum bewegt und dadurch bestimmt, welche Reize verarbeitet werden und welche nicht (Krüger, 2007). In Posner (1980) wird darüberhinaus davon ausgegangen, dass der „Scheinwerfer“ nicht auf zwei unterschiedliche Orte gleichzeitig ausgelenkt werden kann und demnach visuelle Aufmerksamkeit nicht teilbar ist. Diese Metapher lässt sich nicht nur für den Bereich der visuellen Aufmerksamkeit anwenden.

Allgemein kann formuliert werden, „dass auch mentale Mechanismen der Reizverarbeitung selektiv auf Reize ausgerichtet werden können, wobei schneller reagiert werden kann, wenn der Reiz auch fixiert wird“ (Krüger, 2007).

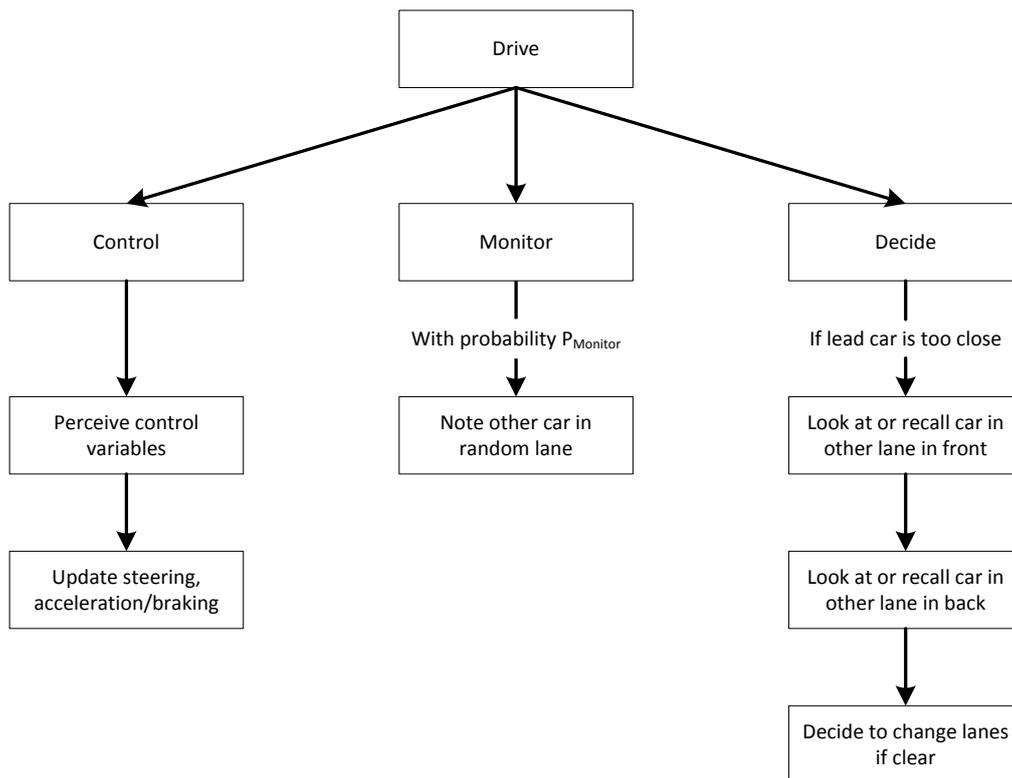
Zur Erfassung der selektiven Aufmerksamkeit bei der Erledigung der Fahraufgabe zeichnen Underwood et al. (2003) bei ihren Versuchen die Blickbewegungen der Probanden auf. Schweigert (2003) geht darüberhinaus davon aus, dass die Dauer der relativen Fixation mit dem Bedeutungsgrad der Fahraufgabe in einer bestimmten Situation korreliert.

---

<sup>1</sup> Schlaf-Wach-Rhythmus mit einer Periodendauer von ca. 24 Stunden

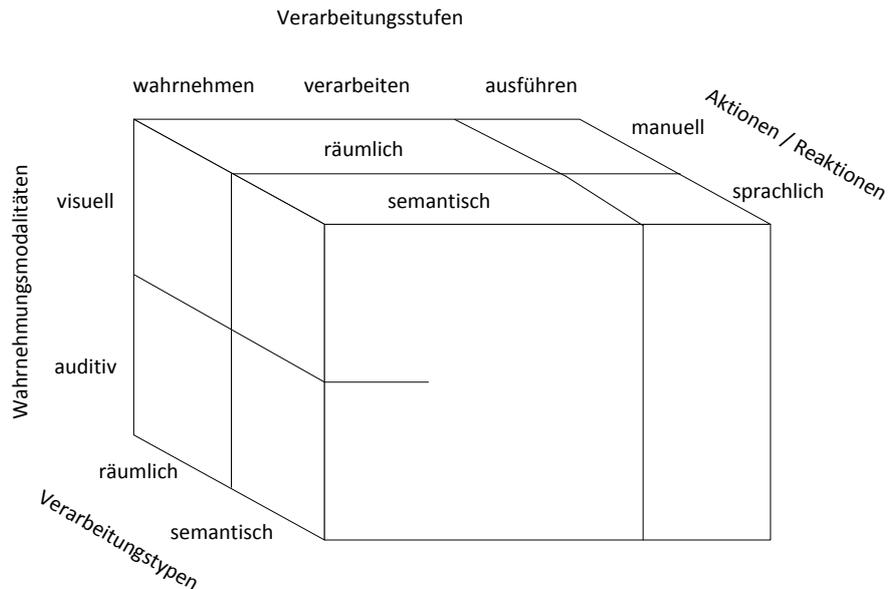
### 2.3.2 Geteilte Aufmerksamkeit

Der Begriff „geteilte Aufmerksamkeit“ impliziert, dass zwei oder mehr Tätigkeiten parallel oder im Wechsel sequentiell abgearbeitet werden können. Salvucci et al. (2001) beschreiben die Tätigkeit des Führens eines Fahrzeugs als Mehrfachaufgabe, wobei die Aufmerksamkeit zwischen den verschiedenen primären, sekundären und tertiären Aufgaben (vgl. Abschnitt 2.1) aufgeteilt werden muss. Mit dieser Aufteilung geht eine Priorisierung der Aufgaben und ein Management der Aufmerksamkeit einher, um den Mehrfachanforderungen der Fahraufgabe gerecht zu werden (Krüger, 2007).



**Abbildung 2.2: Integriertes Fahrermodell: Fahren als Mehrfachaufgabe nach Salvucci (2001)**

In dem in Abbildung 2.2 dargestellten Fahrermodell nach Salvucci (2001) wird die Tätigkeit des Fahrens in die drei Teilaufgaben Steuern (engl. „Control“), Beobachten (engl. „Monitor“) und Entscheiden (engl. „Decide“) unterteilt. Weiter wird davon ausgegangen, dass zur Abarbeitung der verschiedenen Aufgaben nur eine begrenzte kognitive Verarbeitungskapazität zur Verfügung steht. Darüberhinaus belasten Aufgaben, die automatisiert ablaufen, die kognitiven Ressourcen nicht oder nur wenig im Vergleich zu komplexen Handlungen, die mit „vollem Bewusstsein“ durchgeführt werden müssen (Wickens, 1992). Laut Krüger et al. (2007) sind z.B. die Prozesse der Längs- und Querführung, also das Abstand- und Spurhalten, bei geübten Autofahrern hoch automatisierte Prozesse, die demzufolge nur wenige Kapazitäten der kognitiven Ressource binden.



**Abbildung 2.3: Struktur der menschlichen Informationsverarbeitung  
- Modell multipler Ressourcen nach Wickens (1984)**

Wickens (1992) beschreibt den Prozess der menschlichen Informationsaufnahme und -verarbeitung mit einem Modell multipler Ressourcen (vgl. Abbildung 2.3). Konflikte bei der Bearbeitung einzelner Aufgaben entstehen dadurch und sind umso größer, je mehr gleichartige, spezifische Ressourcen im Zuge des Prozesses betroffen sind.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die Modelle nach Salvucci (2001) sowie Wickens (1984) nur Modellierungsmöglichkeiten des für die Erledigung der Fahraufgabe (vgl. Kapitel 2.1 bzgl. Fahraufgabe) so wichtigen Prozesses der geteilten Aufmerksamkeit darstellen. Neben diesen beiden Paradigmen sind in der angewandten Psychologie eine Reihe weiterer Modellierungsmöglichkeiten von Aufmerksamkeitsprozessen vorhanden, die sich allerdings häufig nicht oder nur bedingt zur Erklärung von Aspekten der Fahreraufmerksamkeit eignen. Eine gute Zusammenfassung über weitere Modellierungsmöglichkeiten der Prozesse der geteilten Aufmerksamkeit sowie deren Eignung für eine Anwendung im motorisierten Straßenverkehr ist in Färber (1987) nachzulesen.

### 2.3.3 Daueraufmerksamkeit

In der Literatur ist der Begriff der Daueraufmerksamkeit häufig mit dem Begriff Vigilanz verbunden. Eine allgemein gültige Definition für den Rahmen dieser Arbeit sei hierfür dem Psychologischen Wörterbuch (Dorsch, 1987) entnommen:

„Man bezeichnet [...] als *Vigilanz* [*Wachsamkeit*] den Zustand oder den Grad der Bereitschaft, kleine Veränderungen, die in der Umwelt in zufallsverteilten Zeitintervallen auftreten, zu erkennen und auf sie zu reagieren.“ (Dorsch, 1987)

Während selektive (vgl. Abschnitt 2.3.1) und geteilte Aufmerksamkeit (vgl. Abschnitt 2.3.2) häufig zusammengefasst als gerichtete Aufmerksamkeit bezeichnet werden, spricht man bei *Vigilanz* bzw. *Daueraufmerksamkeit* häufig von ungerichteter Aufmerksamkeit (Kopf, 2005).

Allgemein lässt sich feststellen, dass unter dem *Vigilanz*-begriff die Bereitschaft verstanden wird, auf einen Reiz zu reagieren. Die Abnahme der Anzahl korrekter Reaktionen auf einen Reiz bzw. die Zunahme der Reaktionszeit ist dabei charakteristisch für eine *Vigilanz*-minderung (Krüger, 2007).

## 2.4 Ablenkung und Unaufmerksamkeit

Aus Krüger (2007) lässt sich Folgendes zitieren: „Es wird davon ausgegangen, dass die einzelnen Teilkomponenten der Aufmerksamkeit jeweils von bestimmten dysfunktionalen Modifikatoren beeinträchtigt werden: So wird die selektive Aufmerksamkeit von Stress und Overload gestört, die geteilte Aufmerksamkeit wird von zusätzlicher Ablenkung beeinflusst und auf die *Daueraufmerksamkeit* wirkt sich die Dauer einer Aufgabe negativ aus.“

Nach Ranney et al. (2000) kann Ablenkung in vier Kategorien unterteilt werden, diese sind mit jeweils einem Beispiel in der folgenden Tabelle dargestellt:

| <b>Art der Ablenkung</b> | <b>Beispiel</b>                              |
|--------------------------|--|
| <b>Visuell</b>           | Wegschauen vom vorausfahrenden Verkehr       |
| <b>Akustisch</b>         | Hören einer Radiosendung/eines Hörbuches     |
| <b>Biomechanisch</b>     | Verstellen der Temperatur an der Klimaanlage |
| <b>Kognitiv</b>          | In Gedanken versunken sein                   |

**Tabelle 2.4: Arten von Ablenkung nach Ranney (2000), Tijerina (2000) und Baumann (2006)**

Wie aus Baumann (2006) hervorgeht ist die Ablenkung des Fahrers eine wesentliche Ursache für Fahrfehler und erhöht das Unfallrisiko drastisch (vgl. Abbildung 1.2).

Aus dem Modell multipler Ressourcen nach Wickens (Abbildung 2.3) lässt sich Unaufmerksamkeit bzw. Ablenkung mit der gleichzeitigen Beanspruchung spezifischer Ressourcen durch mehrere Aufgaben oder Reize erklären. Will der Fahrer während der Fahrt z.B. den Radiosender wechseln, muss er kurzzeitig seine visuelle Aufmerksamkeit auf das Radiobedienteil richten, diese Ressource steht dann nicht mehr (vollständig) für die Wahrnehmung des vorausfahrenden Verkehrs zur Verfügung. Die Aktion des Bedienens des Radios beansprucht die manuelle Ressource (Bewegen der

Hand zum Bedienteil) und interferiert damit mit dem durch die Fahraufgabe implizierten Lenken (vgl. dazu auch Trefflich (2007)).

Aus Bruckmayr et al. (1994) lässt sich hinsichtlich visueller Ablenkung bei der Erledigung der Fahraufgabe folgendes zitieren: Der Fahrer ist visuell abgelenkt, wenn der Blick ins Wageninnere oder auf einen für die Erledigung der Fahraufgabe nicht relevanten Reiz fällt und demzufolge „für eine Zeitdauer [...] die Beobachtung des Verkehrsgeschehens nicht verfügbar ist“.

Doch selbst nicht alles, worauf die Augen gerichtet sind, wird auch verarbeitet. Für dieses Phänomen hat sich in der Literatur zum Beispiel bei Herslund (2003), Simons (1999) und Mack (1998) der Begriff „inattentional blindness“ bzw. „looked-but-failed-to-see“ etabliert. In dem Artikel von Brown (2005) werden verschiedene Unfallstudien aus den 70er und 80er Jahren ausgewertet. Ein typisches Beispiel stellt sich dabei wie folgt dar: Ein Fahrer hat nachweislich seinen Blick auf das Fahrzeug eines anderen Verkehrsteilnehmers im Vorfeld eines Abbiegevorganges gerichtet. Trotzdem kollidieren die beiden Fahrzeuge miteinander. In einer Befragung nach dem Unfall gibt der Fahrer weiter zu Protokoll, den Unfallgegner nicht gesehen bzw. wahrgenommen zu haben.

Zusammenfassend lässt sich Ablenkung definieren als alle Tätigkeiten, bei denen der Fahrer seine begrenzten Ressourcen für Wahrnehmung und Verarbeitung (vgl. Abschnitt 2.3.2) vollständig oder teilweise von der eigentlichen primären Fahraufgabe (vgl. Abschnitt 2.1) abwendet. Besonders kritische Ablenkungsformen bei der Fahrzeugführung sind die visuelle Ablenkung, sowie die kognitive und biomechanische Ablenkung. Die Bedeutung der verschiedenen Sinneskanäle für die Informationsaufnahme beim Fahren und somit auch für die Kritikalität der Ablenkung, wird im Abschnitt 2.6 genauer erläutert.

## 2.5 Situationsbewusstsein

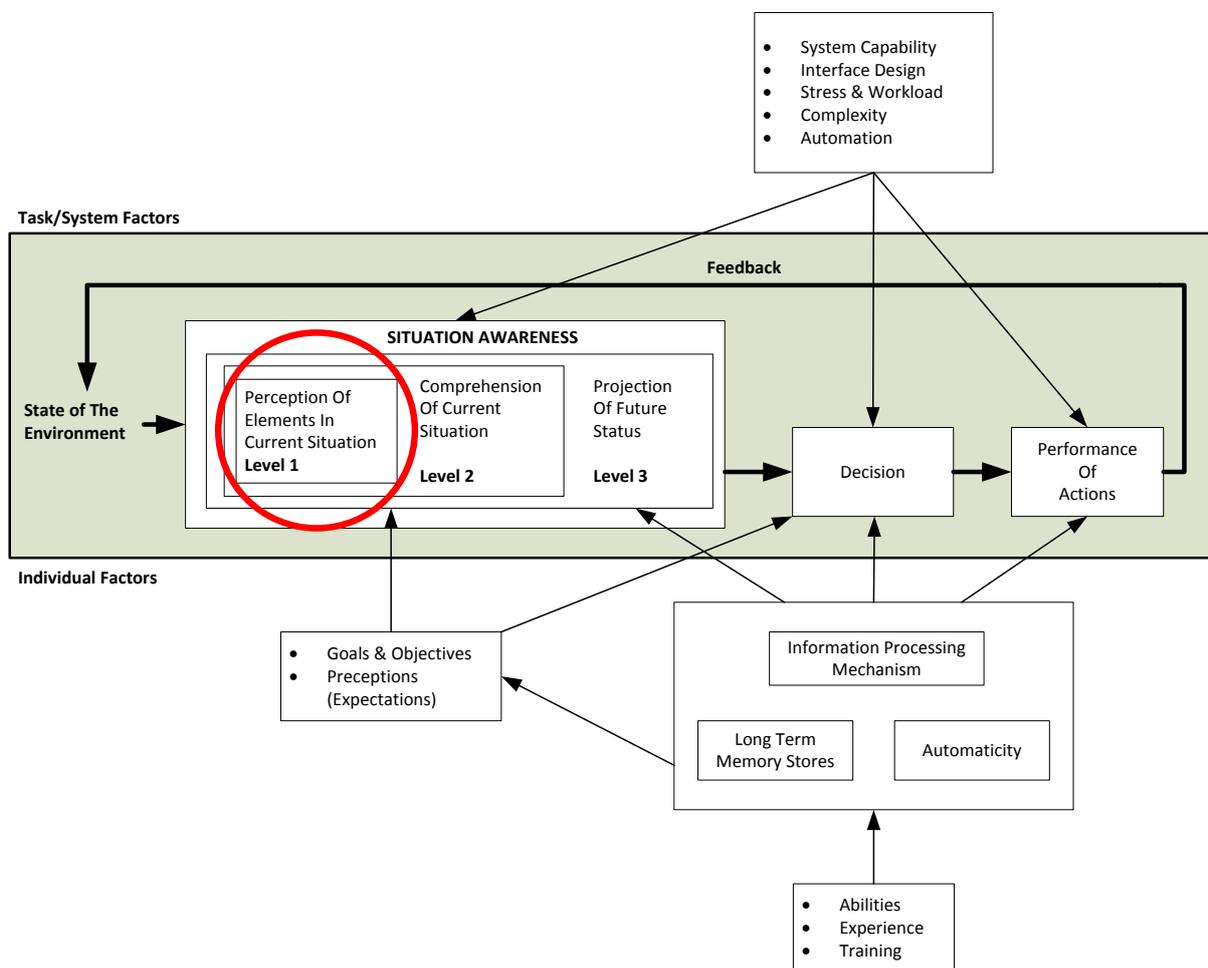
Neben ausreichender Aufmerksamkeit ist hinreichendes Situationsbewusstsein ebenfalls eine Voraussetzung dynamische Umgebungen wie z.B. bei der Fahrzeugführung oder in der Aeronautik wahrzunehmen. Die für den Begriff Situationsbewusstsein am weitesten verbreitete Definition ist die folgende nach Endsley (1995):

*“Situation awareness is the perception of environmental elements within a volume of time and space, the comprehension of their meaning, and the projection of their status in the near future.”*  
(Endsley, 1995)

Oder etwas kürzer gefasst:

Situation awareness is simply *“knowing what’s going on so you can figure out what to do.”* (Adam, 1993)

In dem Modell nach Endsley (vgl. Abbildung 2.4) beschreibt die erste Ebene die Informationsaufnahme, d.h. die Wahrnehmung relevanter Elemente in einer Situation. Daran schließt sich die zweite Ebene, das Verstehen der Situation, an. Dafür werden die in Level 1 wahrgenommenen Informationen in Zusammenhang gebracht und deren Bedeutung erfasst. Level 3 beschreibt den sich darauf aufbauenden Vorgang der Antizipation von zukünftigen Ereignissen ausgehend von der aktuellen Situation. Siehe dazu auch Reichart (2008) sowie Dominguez (1994).



**Abbildung 2.4: Modell des Situationsbewusstseins nach Endsley (1995),  
markiert (roter Kreis) ist die Wahrnehmungsebene**

Bezogen auf den Anwendungsfall des sicheren Führens eines Fahrzeuges lässt sich das Modell des Situationsbewusstseins (vgl. Abbildung 2.4) wie folgt interpretieren: In einer Verkehrssituation müssen im ersten Schritt erst einmal alle relevanten Reize wahrgenommen werden (Level 1).

Anschließend erfolgt das Verstehen des Verkehrsgeschehens (Level 2) sowie eine Abschätzung der zukünftigen Entwicklung (Level 3) der jeweiligen Situation. Erst darauf erfolgen die Planung sowie das Auslösen angemessener Aktionen oder Reaktionen.

Es sei an dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen, dass mit Hilfe von z.B. Videosensorik (vgl. Kapitel 3.3.1) im Allgemeinen nur darüber Aussagen getroffen werden können, welche Teile der Umwelt in einer jeweiligen Situation überhaupt visuell wahrgenommen werden können (vgl. Level 1 bzw. roter Kreis in Abbildung 2.4). Ob die entsprechenden Reize aus dem jeweiligen Umweltausschnitt aber tatsächlich realisiert und verstanden werden (Level 2), lässt sich dagegen alleine auf der Grundlage von heute verfügbaren Sensoren nicht ermitteln (vgl. Kapitel 2.7). Grundsätzlich kann aber formuliert werden, dass nur das verstanden werden kann, was im Vorfeld zumindest wahrgenommen wurde bzw. unter den gegebenen Randbedingungen überhaupt wahrnehmbar war. Die verschiedenen menschlichen Wahrnehmungskanäle sowie die besondere Bedeutung des visuellen Sinneskanals bei der Fahrzeugführung sind deshalb Gegenstand des folgenden Teilkapitels 2.6.

## **2.6 Wahrnehmungskanäle bei der Fahrzeugführung**

Der Informationsverarbeitungsprozess des Menschen kann in drei sequentiell aufeinanderfolgende Teilschritte untergliedert werden (Wickens, 1984). Der erste Schritt ist die Informationsaufnahme über die Sinneskanäle, der zweite die Informationsverarbeitung und der dritte die Informationsumsetzung in Form einer Reaktion oder Aktion durch die Extremitäten oder durch Sprache (Wolf, 2000).

Dem visuellen Kanal fällt bei der Fahrzeugführung die größte Bedeutung zu. In einer Reihe von Veröffentlichungen z.B. in Rockwell (1972), Hella (1987) und Fairclough (1993) wird ein Anteil von bis zu 90% für die Informationsaufnahme beim Fahren eines Kraftfahrzeugs genannt. Im Weiteren ist der akustische Sinneskanal z.B. für eine Abschätzung der Geschwindigkeit anhand der Umgebungsgeräusche wichtig. Informationen zur Fahrdynamik werden außerdem haptisch, z.B. anhand von Lenkkräften sowie über das Gleichgewichtsorgan (kinästhetisch) wahrgenommen. Dabei ist dem Fahrer über den haptischen Kanal, beispielsweise als Reaktion auf eine Lenkradvibration, die schnellste Reaktion möglich (Wolf, 2000). Olfaktorische und gustatorische Wahrnehmungen spielen dagegen bei der Erledigung der Fahraufgabe keine Rolle.

## 2.6.1 Der visuelle Sinneskanal

Gründe für die besondere Bedeutung der visuellen Wahrnehmung bei der Erledigung der Fahraufgabe sind zum einen, dass das Auge als einziges Sinnesorgan durch Blick- und Kopfbewegungen gezielt auf einen Reiz ausgerichtet werden kann. Zum anderen ist der visuelle Sinneskanal die einzige Möglichkeit vorausliegende Objekte sowie deren Größe und Abständen wahrzunehmen. Durch den visuellen Sinnesapparat ist es möglich, im wahrsten Sinne des Wortes ein Bild von den geometrischen Verhältnissen der Umwelt zu erlangen (Schweigert, 2003).

Der Bereich, in dem eine scharfe Wahrnehmung von Objekten möglich ist, ist relativ eingeschränkt. Er erstreckt sich kegelförmig mit einem Öffnungswinkel von ca.  $\pm 1^\circ$  um die optische Achse. Ausgangspunkt und damit die Spitze des optischen Kegels bildet dabei der gelbe Fleck (lat. fovea centralis) auf der Netzhaut des menschlichen Auges. Nur Objekte, die im gelben Fleck auf der Netzhaut abgebildet werden, erscheinen „scharf“. An den Bereich des scharfen Sehens schließt sich der paravofeale Sichtbereich mit einem Kegelöffnungswinkel von ca.  $10^\circ$  an. Außerhalb dessen befindet sich der Bereich des peripheren Sehens (vgl. Abbildung 2.5).

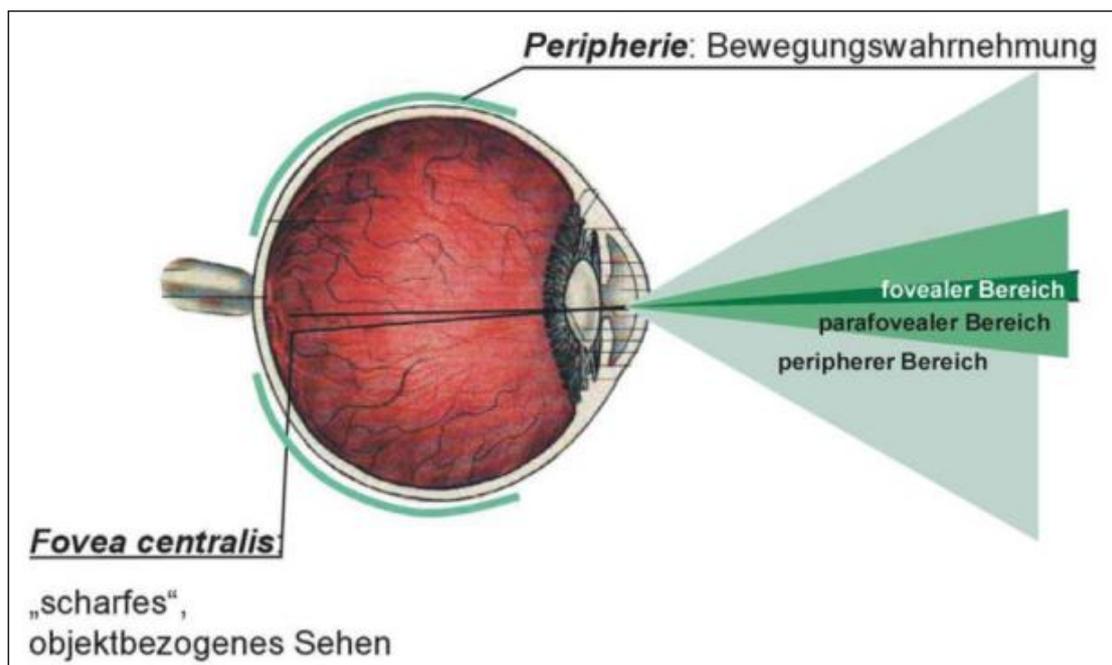


Abbildung 2.5: Das menschliche Auge (Schweigert, 2003)

Durch die periphere visuelle Wahrnehmung ist es möglich, Objekte im Raum, deren Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung sowie Helligkeitsveränderungen zu erfassen.

Anhand der folgenden Definitionen lässt sich der Bereich der visuellen Wahrnehmung weiter unterteilen:

### **Gesichtsfeld**

Das Gesichtsfeld lässt sich als der Bereich definieren, in dem ein optischer Reiz, ohne Augen- und Kopfbewegungen zuzulassen, wahrgenommen werden kann (Grossman (1963) zitiert nach Rantanen (1999)).

### **Blickfeld**

Das Blickfeld beschreibt die räumliche Region, in der Objekte wahrgenommen werden können, wenn der Kopf des Betrachters fixiert bleibt und nur Augenbewegungen zugelassen werden (ISO 15007-1, Schmidtke (1993)). Das Blickfeld weist somit eine größere räumliche Ausdehnung auf, als das Gesichtsfeld.

### **Umblickfeld**

Für die Definition des Umblickfeldes werden neben Augen- auch Kopfbewegungen zugelassen. Es beschreibt somit den Bereich aller mit den Augen fixierbaren Punkte unter der Randbedingung, dass dafür sowohl die Augen als auch der Kopf bewegt werden darf. Der Bereich des Umblickfeldes ist dadurch noch einmal deutlich größer gegenüber dem Blick- bzw. Gesichtsfeld (Schweigert (2003), ISO 15007-1).

Neben diesen Festlegungen taucht in der Literatur, z.B. bei Rantanen (1999), Crundal (1999) und Williams (1995), häufig der Begriff des nutzbaren Sehfeldes (engl. UVOF - useful field of view) auf. Das nutzbare Sehfeld unterscheidet sich von den zuvor gemachten Definitionen dadurch, dass damit der Bereich der visuellen Wahrnehmung beschrieben wird, in dem optische Reize nicht nur sichtbar sind sondern auch wahrgenommen und verarbeitet werden. Die Größe des UVOF ist wesentlich von der kognitiven Belastung abhängig (vgl. „Spotlight Metapher“ in Abschnitt 2.3.1 „Selektive Aufmerksamkeit“) und liegt typischer Weise im Bereich von +/- 1° bis +/- 2° um die optische Achse, siehe dazu auch Martens (2000) sowie Miura (1990). Bei hoher mentaler Belastung, z.B. durch Nebenaufgaben während der Fahrt, ist das nutzbare Sehfeld in seiner Ausdehnung vergleichbar mit dem fovealen Sichtbereich (Recarte (2003), Olsson (2000), Nunes (2002)).

Darüberhinaus weist Grüsser (1987) darauf hin, dass bei Blickwinkeln unter 10° meist nur die Augen bewegt werden. Bei Objekten in größerer Entfernung von der optischen Achse erfolgt eine Zuwendung meist zusammen mit einer Kopfbewegung (Schweigert, 2003).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das Sehen der Sinneskanal ist, dem beim Führen eines Fahrzeuges die größte Bedeutung zu kommt. Dabei werden die meisten visuellen Informationen in

dem relativ kleinen Bereich des scharfen Sehens von ca.  $\pm 1^\circ$  um die Blickrichtungssachse wahrgenommen. Zur Bestimmung der jeweiligen Lage des visuellen Fokus und somit des Umweltausschnittes des Umblickfeldes, welcher vom Fahrer überhaupt nur visuell wahrgenommen werden kann, ist die Fahrerblickrichtung der geeignetste Parameter. Eine Grobausage über die jeweilige Orientierung des visuellen Fokus sollte außerdem anhand der Kopforientierung möglich sein, da Blickzuwendungen, insbesondere zu weiter als  $10^\circ$  von einander entfernt liegenden optischen Reizen, meist durch eine Kombination von Augen- und Kopfbewegungen erfolgen.

Kamerabasierte Fahrerbeobachtungssysteme, die eine Erfassung der Fahrerblickrichtung bzw. lediglich der Fahrerkopforientierung in Teilen des Fahrerumblickfeldes ermöglichen, sind Gegenstand der Teilkapitel 3.3.1.2 „Das Face Lab System – ein Mehrkameranensystem“ bzw. 3.3.1.1 „Der Driver State Sensor (DSS) – ein Monokameranensystem“. In Kapitel 5 wird der Fragestellung, inwieweit Blickverhalten und Kopforientierung in typischen Fahrsituationen miteinander korrelieren, noch einmal detailliert im Rahmen einer Probandenstudie nachgegangen. Das DSS System, welches nur eine Erfassung der Kopforientierung ermöglicht, kommt darüberhinaus im weiteren Verlauf dieser Arbeit bei der prototypischen Umsetzung von fahrer aufmerksamkeitsadaptiven FAS-Warnkonzepten in Kapitel 7 zum Einsatz.

## 2.7 Möglichkeiten der Fahrerzustandserkennung

Die Ansätze, Informationen über den Fahrerzustand bzw. die –aufmerksamkeit zu erlangen, lassen sich grundsätzlich in zwei verschiedene Herangehensweisen unterteilen.

Eine Möglichkeit bietet der Ansatz, physiologische Parameter des Fahrers direkt zu erfassen und im Hinblick auf seinen Zustand sowie seine Aufmerksamkeit zu interpretieren. Auf die wesentlichen direkt erfassbaren Messgrößen und die damit verbundene Sensorik wird im folgenden Teilkapitel 2.7.1 detaillierter eingegangen.

Den zweiten Ansatzpunkt bietet die Analyse von Parametern, die vom Fahrer in Folge der Erfüllung der Fahraufgabe beeinflusst werden. Hintergrund ist dabei die Detektion von typischen Auffälligkeiten in den Parameterverläufen, die auf Ablenkung bzw. Unaufmerksamkeit schließen lassen. Eine Einschätzung des Fahrerzustandes erfolgt damit auf Basis indirekter, den Fahrerzustand beschreibender Messgrößen. Vorteil dieses Ansatzes ist, dass er nahezu ohne zusätzliche Sensorik auskommt. Geeignete Fahrparameter und entsprechende Messmethoden werden im Kapitel 2.7.2 vorgestellt und diskutiert.

Tabelle 2.5 gibt zusätzlich einen Überblick über verschiedene Zustandsfaktoren und entsprechende Messgrößen, anhand welcher der Fahrerzustand näher charakterisiert werden kann. Grau hinterlegt

sind dabei die Parameter, die mit Hilfe der im weiteren Verlauf dieser Arbeit zum Einsatz kommenden Videosensorik (vgl. Kapitel 3.3.1 Kamerasysteme) erfasst werden können.

| <i>Zustandsfaktor</i><br><i>Messgröße</i>                | <b>Aufmerksamkeit</b> | Wachsamkeit<br>(Aktivierung) | Ermüdung | Fahrer-<br>absicht | Belastung<br>kognitiv |
|--|-----------------------|------------------------------|----------|--------------------|-----------------------|
| Lidschlag  |                       | XX                           | XX       |                    | XX                    |
| <b>Blickbewegung</b>                                     | <b>XX</b>             | X                            |          | XX                 | X                     |
| <b>Blickrichtung</b>                                     | <b>XX</b>             |                              |          | XX                 |                       |
| Pupillengröße  |                       |                              | X        |                    | X                     |
| <b>Kopfposition/-richtung</b>                            | <b>XX</b>             |                              | XX       | XX                 |                       |
| Fahr-/Bedienverhalten<br>(Lenkung, Beschl. ...)          | X                     |                              | XX       | XX                 | X                     |
| Umgebungsinformationen<br>(Objekte, Straßentyp,<br>Spur) |                       |                              |          | XX                 | XX                    |
| Sitzruhe/Sitzhaltung                                     | X                     | XX                           | XX       |                    |                       |
| Sprachanalyse  | X                     |                              | X        |                    | XX                    |
| Herzfrequenz   |                       | XX                           |          |                    | XX                    |
| Hautwiderstand   |                       | XX                           | XX       |                    | XX                    |
| Hirnaktivität  | XX                    | XX                           | XX       | X                  | XX                    |

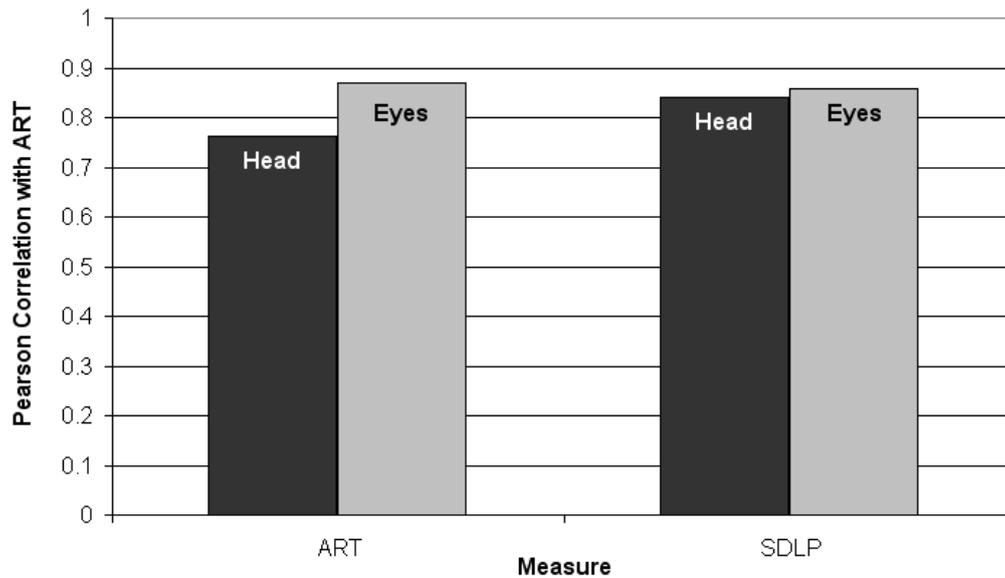
**Tabelle 2.5: Korrelation (XX = gesichert, X = vermutet) zwischen Messgrößen und Fahrerzustandsfaktoren in Anlehnung an Kopf (2005)**

## 2.7.1 Direkte Verfahren der Fahrerzustandserkennung

### 2.7.1.1 Berührungslos erfassbare Parameter

#### **Blickrichtung und Kopforientierung**

In Summala et al. (1998) wird gezeigt, dass der Fahrer deutlich später auf das Aufleuchten der Bremslichter eines vorausfahrenden Fahrzeugs reagiert, wenn der Blick nicht nach vorne auf die Straße gerichtet ist. Daraus kann gefolgert werden, dass anhand der Blickrichtung Aussagen über die zu erwartenden Reaktionszeiten des Fahrers bzw. den kurzfristigen Fahrerzustand (vgl. Tabelle 2.2) getroffen werden können.



**Abbildung 2.6: Korrelation zwischen Blickrichtung (Eyes), Kopforientierung (Head) und unaufmerksamer Fahrweise<sup>2</sup> nach Zhang et al. (2008)**

Die Ergebnisse der Studie von Zhang et al. (2008) belegen, dass der Anteil der Blickabwendungen von der Straße sowie die zugehörigen Blickrichtungsvektoren ein valides Maß sind, um während der Fahrt Informationen über die visuelle Ablenkung des Fahrers zu erhalten. Weiter wird darauf hingewiesen, dass typischer Weise die meisten Fahrer eine Kombination aus Blick- und Kopfbewegungen verwenden, um ihren visuellen Aufmerksamkeitsfokus auf ein Ziel auszurichten. Schon die Kopfpose „is likely to be able to detect the worst-case visual distractions“ (Zhang, 2008). Darüberhinaus zeigt die Studie eine hohe Korrelation zwischen der Blickrichtung und der Fahrerablenkung. Die Korrelation zwischen Kopforientierung und unaufmerksamer Fahrweise fällt dem gegenüber nur geringfügig schwächer aus (Abbildung 2.6). Selbst die Kopfabwendung, gleitend gemittelt über ein ca. 4 Sekunden langes Zeitintervall, korreliert gut mit der binären Aussage ob der Fahrer im jeweiligen Moment aufmerksam ist oder nicht.

### **Blickdauer**

Doch nicht alleine die Richtung des visuellen Aufmerksamkeitsfokus ist aussagekräftig hinsichtlich der Ablenkungswirkung. Zhang und Smith (2004) schreiben, dass die Dauer der Blick- oder Kopfabwendung, z.B. gemittelt über ein 5s Zeitfenster, sich besser eignet, um die aktuelle

---

<sup>2</sup> Bestimmt durch die Reaktionszeit für das Vom-Gas-Gehen (ART) bzw. die Standardabweichung der Spurposition des Fahrzeugs (SDLP).

Fahrerablenkung einzuschätzen, als ein Ansatz, bei dem versucht wird, die Blickabwendung einer spezifischen ablenkenden Nebenaufgabe (z.B. Radiobedienung) zuzuordnen. Soll nur eine binäre Aussage getroffen werden, ob der visuelle Aufmerksamkeitsfokus auf die vorausliegende Straße gerichtet ist oder nicht, schlagen die Autoren vor, eine rechteckige „Aufmerksamkeitsregion“ mit einer Größe von ca. +/- 12° um die optische Blickachse zu definieren. Liegt der Blick oder die Kopforientierung innerhalb dieses Bereiches, kann der Fahrer als aufmerksam eingestuft werden. Bei einem längeren Verlassen dieser Region ist der Fahrer abgelenkt.

Doch welche Blickdauern sind typisch für die Erledigung von tertiären Fahraufgaben? Ab welchen Blickabwendungszeitdauern wird es kritisch? In der Literatur sind diesbezüglich eine Reihe von Studien zu finden, beispielsweise Wierwille (1997) und (1995). Der bereits zitierten „100-Car-Study“ (NHTSA, 2006) ist in diesem Zusammenhang zu entnehmen, dass bei Blickabwendungen von größer 2s vom vorausfahrenden Verkehr ein deutlicher Anstieg des Crash- bzw. des Beinahe-Crash-Risikos zu verzeichnen ist (vgl. Abbildung 1.3). Rockwell (1988) gibt einen Überblick über typische Blickdauern bei der Erledigung von Nebenaufgaben während der Fahrt (vgl. Tabelle 2.6). „Die durchschnittliche Blickdauer auf konventionelle Fahrzeugeinrichtungen liegt somit in der Größenordnung von 1s +/- 0,5s und damit in der gleichen Größenordnung wie die 0,8 bis 1,2s, die in der StVO zur Bestimmung der zur Einhaltung des Mindestabstandes zurückgelegten Wegstrecke vorgeschrieben sind“ (Bruckmayr (1994) zitiert nach Theofanou (2002)).

| Blickort             | Blickdauer in s                         |
|----------------------|---|
| Radio                | 1,37                                    |
| Linker Außenspiegel  | 1,1 <sup>3</sup> bzw. 1,27 <sup>4</sup> |
| Rechter Außenspiegel | 1,13                                    |
| Innenspiegel         | 1,0                                     |
| Tachometer           | 0,8                                     |

**Tabelle 2.6: Durchschnittliche Blickdauer in Abhängigkeit vom Blickort (Rockwell, 1988)**

Die Analyse von Toaka (1990), die sich im Wesentlichen auf Studien von Rockwell (1988) und Wierwille (1988) stützt, kommt zu ähnlichen Ergebnissen im Hinblick auf typische Blickdauern (vgl. Tabelle 2.7). Zur Verdeutlichung der Komplexität der Situation muss erwähnt werden, dass die aufgeführten Blickdauern keine fixen Größen darstellen. Sie sind vielmehr von einer Reihe von Faktoren wie z.B. Verkehrsdichte, Fahrerfahrung, Interfacegestaltung und dem Alter des Fahrers abhängig (Crundall, 1998). Die Ergebnisse der Studie von Rockwell (1988) verdeutlichen dies. Dort beträgt beispielsweise die Blickdauer bei niedrigem Verkehrsaufkommen auf ein Straßenschild 2s, bei

---

<sup>3</sup> Bei einer Detektionsaufgabe

<sup>4</sup> Bei einer Identifikationsaufgabe

hoher Verkehrsdichte jedoch nur noch 0,9s im Mittel. Wierwille et al. (1988) weisen nach, dass die Blickdauern nach außen bei hoher Verkehrsdichte von 1,2s auf 3,0s ansteigen und gleichzeitig die Wahrscheinlichkeit sinkt, dass im Fahrzeug eine Navigationsanzeige betrachtet wird. Bei Tijerina et al. (2000) treten dazu ebenfalls im Vergleich relativ lange Blickdauern auf das Navigationssystem auf. Diese liegen im Bereich von 2,5s – 3,2s, abhängig von der Position des Bildschirms des Navigationsgerätes im Fahrzeugcockpit.

| <b>Blickort</b>          | <b>Mittelwert<br/>Blickdauer<br/>in s</b> | <b>Standard-<br/>abweichung<br/>in s</b> |
|--------------------------|---|--|
| <b>Radio</b>             | 1,44                                      | 0,50                                     |
| <b>Linker Spiegel</b>    | 1,10                                      | 0,30                                     |
| <b>Innenspiegel</b>      | 0,75                                      | 0,36                                     |
| <b>Tachometer</b>        | 0,62                                      | 0,48                                     |
| <b>Temperaturanzeige</b> | 1,10                                      | 0,52                                     |
| <b>Straßenschild</b>     | 1,63                                      | 0,80                                     |
| <b>Entfroster</b>        | 1,14                                      | 0,61                                     |

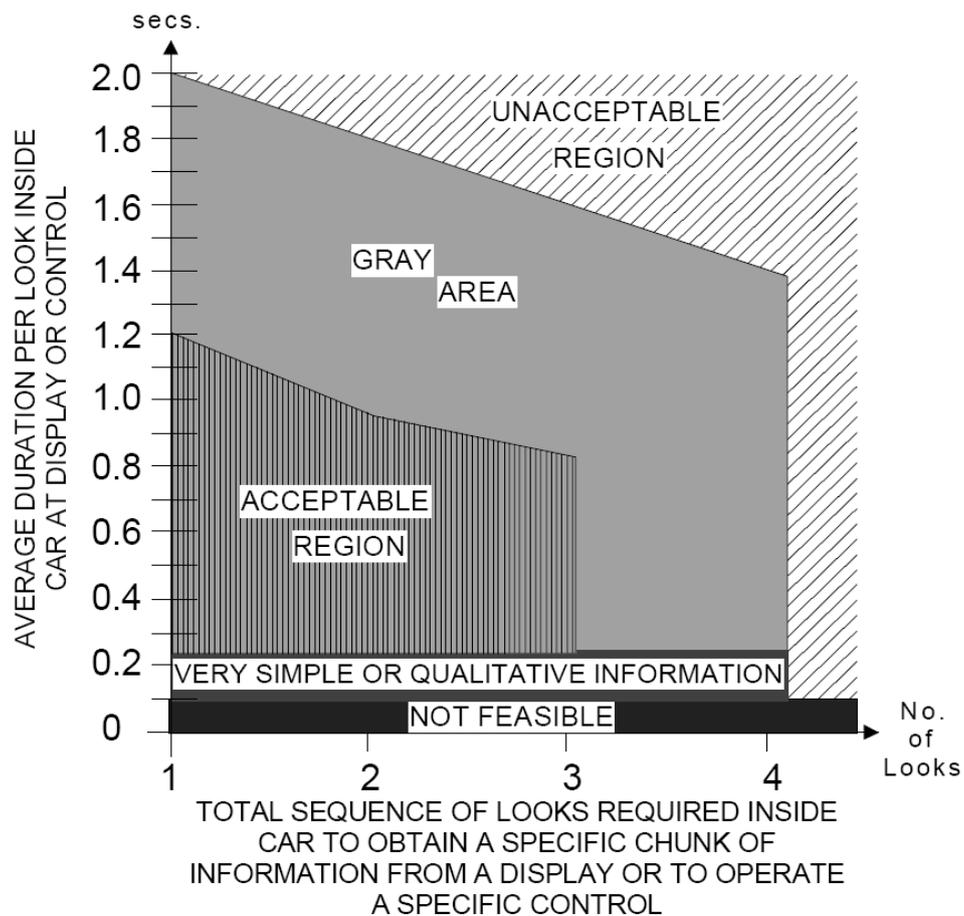
**Tabelle 2.7: Blickdauern für verschiedene Blickorte  
(Toaka (1990) zitiert nach Theofanou (2002))**

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass in einer Reihe von Studien, z.B. in Bruckmayr (1994) und in Rockwell (1988), ein durchschnittlicher Wert von 1,5s für die Blickabwendungsdauern bei der Erledigung von tertiären Fahraufgaben nachgewiesen wurde.

Demnach ist nicht verwunderlich, dass die Europäische Kommission (2005) vorschlägt Displayinhalte in Fahrzeugen so zu gestalten, dass alle relevanten Elemente mit einem einzigen Blick mit einer Dauer von ca. 1s während der Fahrt identifiziert werden können.

### **Blickfolgen**

Die U.S. National Highway Traffic Safety Administration fordert die Automobilhersteller dazu auf, visuelle und visuell-manuelle Bedienkonzepte im Fahrzeug so auszulegen, dass Blickzuwendungen von 2s bei der Bedienung nicht überschritten werden (NHTSA, 2002). Zum anderen soll die gesamte Bedienhandlung nicht mehr als 20s in Summe an Einzelblickzuwendungen beanspruchen. Daran anschließend sei an dieser Stelle auf die Untersuchung von Zwahlen (1988) verwiesen. Dort werden neben der Dauer einer einzelnen Blickzuwendung auch der Einfluss von Blickfolgen, bestehend aus einer Reihe von kurzen Einzelblicken, auf die Ablenkungswirkung bei der Erledigung der Fahraufgabe untersucht. Die Ergebnisse der Studie sind in der Grafik in Abbildung 2.7 dargestellt.



**Abbildung 2.7: Zusammenhang zwischen Blickdauer, Blickhäufigkeit und Kritikalität im Straßenverkehr  
(Zwahlen, 1988)**

Abbildung 2.7 kann so interpretiert werden, dass Einzelblicke mit einer Länge von bis zu 1,2s gerade noch akzeptabel sind. Blicke mit einer Dauer von 1,2s bis 2s liegen im Graubereich („Gray Area“). Einzelblickzuwendungen von mehr als 2s sind inakzeptabel. Eine Folge von bis zu 3 Blicken wird als unkritisch eingestuft, wenn die erste Zuwendung 1,2s nicht übersteigt und die Blickdauer für die folgenden Blicke stetig abnimmt, sodass der letzte eine Dauer von höchstens 0,9s aufweist („Acceptable Region“). Blickfolgen von 3 bis 4 Blicken werden als fragwürdig eingeschätzt. Treten mehr als 4 Blicke in Folge auf, ist dies inakzeptabel im Hinblick auf die Verkehrssicherheit.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass in der Literatur keine fest definierten Zahlenwerte zu finden sind, ab wann Blickabwendungen als kritisch hinsichtlich ihrer visuellen Ablenkungswirkung (vgl. Tabelle 2.4) einzustufen sind. Es kann aber geschlossen werden, dass ein einzelner Blick mit einer maximalen Dauer von bis zu 1,5s noch vertretbar ist. Tertiäre Fahraufgaben (vgl. Tabelle 2.1), die Blickfolgen bedingen, sollten nach maximal 3 Blickzuwendungen mit einer Einzeldauer von deutlich unter 1,5s abgeschlossen sein, um kein erhöhtes Ablenkungsrisiko zu generieren.

### Sensorik

Mit welcher Sensorik lassen sich nun Blickrichtung bzw. Kopforientierung bestimmen? Die im nachfolgenden Abschnitt 2.7.1.2 beschriebene EOG Methode ermöglicht die Erfassung von Augenbewegungen, eine Erfassung der Kopfbewegungen ist damit jedoch nicht möglich. Mit Hilfe des in der Studie von Zhang et al. (2008) verwendeten Face Lab Kamerasystems der Firma Seeing Machines lassen sich sowohl Blickrichtung als auch die Kopforientierung des Fahrers erfassen. Das Mehrkammersystem Face Lab als auch das Monokammersystem DSS finden im Rahmen der Versuchsreihen dieser Arbeit ebenfalls Verwendung und werden im Abschnitt 3.3.1 detailliert erläutert. Kamerabasierte Fahrerbeobachtungssysteme bieten neben Kopf- und Blickrichtungsinformationen meist weitere Kenngrößen beispielsweise zum Augenöffnungsgrad sowie dem Lidschlagverhalten. Aufbauend auf diesen Parametern lassen sich Aussagen über die Fahrermüdigkeit treffen (Hargutt (2001), vgl. auch Tabelle 2.5).

Ein Vorteil der videogestützten Fahrerbeobachtung ist, dass solche Systeme relativ gut in einem Fahrzeug integrierbar sind. Sie sind nicht intrusiv<sup>5</sup> und schränken den Fahrer somit nicht in seiner Bewegungsfreiheit sowie den gewohnten Handlungsabläufen ein. Kamerabasierte Fahrerbeobachtung ist mittlerweile nicht mehr nur im Bereich der Forschung anzutreffen. Neben den sehr teuren und aufwändigen Forschungssystemen DSS und Face Lab hat Lexus im Jahr 2007 als erster PKW-Hersteller auf dem europäischen Markt ein eigenes kamerabasiertes Fahrerbeobachtungssystem eingeführt (vgl. Abschnitt 3.2).

Nachteil der videogestützten Sensorik ist, dass damit nur der visuelle Aufmerksamkeitsfokus des Fahrers bestimmt werden kann und somit nur Rückschlüsse auf die visuelle Aufmerksamkeit getroffen werden können. Effekte wie „Inattentional Blindness“ (Mack, 1998) oder „Looked-but-failed-to-see“ (Brown (2005) und Herslund (2003)) können damit nicht ausgeschlossen werden (vgl. auch Abschnitt 2.4).

Bezogen auf das Situationsbewusstseinsmodell (vgl. Abbildung 2.4) von Endsley (1995) bedeutet dies, dass anhand von Kerasensorik lediglich Aussagen über das 1. Level „Perception“ möglich sind. Darüberhinaus zeigen verschiedene Studien, z.B. Recarte (2000), Dornhöfer (2000), Koga (1990) und Breitmeyer (1990), eine Korrelation zwischen Mikroaugenbewegungen (Sakkaden) bzw. der Blickfixationsdauern und der tatsächlichen kognitiven Wahrnehmung eines Objektes. Bleiben diese Sakkaden aus, kann darauf geschlossen werden, dass das angeblickte Objekt kognitiv nicht wahrgenommen wird (Modell nach Endsley, 2. Level „Comprehension“). Allerdings stoßen bei der Registrierung dieser Mikroaugenbewegung selbst aktuelle berührungslose Mehrkammersysteme wie z.B. das Face Lab System (vgl. Kapitel 3.3.1.2) an ihre Grenzen und liefern nicht die dafür

---

<sup>5</sup> intrusiv - nicht berührungslos

notwendigen Genauigkeiten bei der Ausgabe der Blickrichtungsparameter. Messverfahren, mit denen eine hinreichend genaue Detektion von Sakkaden (vgl. Latimer (1990) und Nattkemper (1990)) möglich ist, sind im Allgemeinen auf intrusive Sensoren angewiesen. Beispiele, für Messprinzipien mit ausreichend hoher Genauigkeit für die Sakkadenerkennung, sind das EOG (vgl. Abschnitt 2.7.1.2) sowie verschiedene helm- oder brillenbasierte Eye Tracker (vgl. SR Research Ltd (2009), SMI – Senso Motoric Instruments (2009)).

### 2.7.1.2 Intrusiv erfassbare Parameter

#### **Puls und Herzschlag**

Anhand eines Elektrokardiogramms (EKG) kann der Herzrhythmus eines Fahrers aufgezeichnet werden. Studien (Steele, 2004) haben ergeben, dass Menschen in Phasen geminderter Vigilanz und Unaufmerksamkeit allgemein geringere Herzaktivität mit einer höheren Variabilität aufweisen. Auf Grundlage dessen kann daher aus der Herzaktivität auf den Aufmerksamkeits- bzw. den Wachzustand eines Fahrers geschlossen werden (Healey (1999) und Frijda (1986)).

Die Herzaktivität weist starke interindividuelle Schwankungen auf. Dadurch ist es nicht möglich, eine absolute Schranke des Herzaktivitätsniveaus festzulegen, unter welcher ein Fahrer als unaufmerksam eingestuft werden kann. Neben dem EKG kann der Puls bzw. der Herzschlag auch mit einem Blut-Volumen-Puls Sensor, der beispielsweise am Oberarm des Fahrers befestigt wird, bestimmt werden.

#### **Hirnaktivität**

Die elektromagnetische Aktivität des Gehirns kann mit Hilfe eines Elektroenzephalogramms (EEG) bestimmt werden. Dazu werden typischerweise 32 Elektroden am Kopf angebracht und mit 500Hz abgetastet. Die aufgezeichneten Signalverläufe können in Alpha- und Thetawellen unterschieden werden. Alphawellen liegen dabei in einem Frequenzbereich von 8 - 12Hz und Thetawellen in einem Spektrum von 4 - 7Hz. Die Studien von Steele (2004) und von Santana Díaz (2002) haben gezeigt, dass eine Vigilanzminderung mit einer Zunahme der Alpha-Aktivität einhergeht.

#### **Hautleitwert**

Zur Bestimmung des Hautleitwertes wird ein schwacher Strom über eine Elektrode an die Haut des Fahrers angelegt. Aufgrund der variierenden, an der Haut abfallenden Spannung kann nach dem Ohmschen Gesetz der Hautleitwert bestimmt werden. Im Zuge von emotional-affektiven Reaktionen kommt es zu einer erhöhten Schweißsekretion, die ein kurzzeitiges Erhöhen des Hautleitwertes bewirkt. Der Hautleitwert gibt das Stress- bzw. Aufmerksamkeitsniveau eines Menschen sehr schnell

und direkt wieder (Cacioppo (1990) und Helander (1978)). Bewältigt der Fahrer beispielsweise sehr monotone Aufgaben, oder wird er müde und damit unaufmerksam, sinkt der Hautleitwert (Steele, 2004).

Die elektrodermale Aktivität könnte z.B. am Lenkrad intrusiv gemessen werden. Schwierig hierbei ist allerdings, dass der gemessene Leitwert bei einer solchen Anordnung abhängig von der Griffstärke sein würde.

### **Augenbewegungen**

Eine hochgenaue Messmethode neben verschiedenen helm- oder brillenbasierten Eye Trackern (vgl. SR Research Ltd (2009), SMI – Senso Motoric Instruments (2009)) zur Bestimmung der Augenbewegungen eines Menschen stellt das Elektrookulogramm (EOG) dar. Dabei werden die elektrischen Dipoleigenschaften des Auges genutzt. Zwischen Hornhaut und Netzhaut besteht eine Potentialdifferenz. Der Spannungswert in der Größenordnung von 1mV ist dabei allerdings nicht konstant und z.B. vom Adaptionszustand des Auges und vom Aufmerksamkeitszustand des Probanden abhängig. Das elektrische Feld ist mit Oberflächenelektroden, die nahe dem Auge auf die Haut geklebt werden, messbar. In Abhängigkeit vom Blickwinkel ändert sich das elektrische Potential deutlich. Vor einer jeden Messung muss eine Eichung stattfinden. Damit kann im Weiteren jedem Spannungswert ein bestimmter Blickwinkel zugeordnet werden. „Das registrierbare Gesichtsfeld beim EOG beträgt bis zu +/- 80°, wobei im Bereich über 30° nicht mehr sehr genau gemessen werden kann [...]“ (Rötting, 1999). Im horizontalen Bereich sind Genauigkeiten von typischer Weise +/- 1° bis +/- 1,5° erreichbar, im Vertikalbereich etwa +/- 2°. Das EOG eignet sich für die Messung von Augenbewegungen die größer als 1° sind (Rötting, 1999). Probleme entstehen durch Lidschläge und Potentialüberlagerungen durch die Gesichtsmuskulatur.

Für weiterführende Informationen zur Bedeutung der Blickrichtung für die Erfassung der visuellen Fahreraufmerksamkeit sei an dieser Stelle auf Abschnitt 2.7.1.1 verwiesen.

Es ist anzumerken, dass die hier vorgestellten physiologischen Messgrößen (Herzschlag, Puls, Hirnaktivität, Hautleitwert und Augenbewegungen) im Allgemeinen nur intrusiv und mit großem messtechnischem Aufwand hinreichend genau zu erheben sind. Diesen Verfahren fällt aus diesen Gründen in der Kraftfahrzeugtechnik nur eine geringe Bedeutung zu. Sie kommen allenfalls im Forschungsbereich z.B. als Referenzsensorik zum Einsatz.

## 2.7.2 Indirekte Verfahren - Fahrerzustandserkennung auf Basis von Fahrzeugparametern

Messmethoden, die nicht direkt auf physiologischen Parametern des Fahrers basieren, aber dennoch Aussagen über dessen Zustand und Aufmerksamkeit zulassen, sollen im Folgenden vorgestellt und diskutiert werden.

### Spurposition

Ein in der Literatur, z.B. Rimini-Doering (2001) und Hess (1990), häufig zu findender Ansatz zur Bestimmung des Fahrerzustandes auf Basis von Fahrparametern ist die Auswertung der Spurhaltegüte. Dabei wird betrachtet, wie gut der Fahrer das Fahrzeug innerhalb der Fahrspur steuert. Die Standardabweichung der Spurposition (engl. Standard Deviation of Lane Position – SDLP, vgl. Abbildung 2.6) weist eine starke Korrelation mit visueller Unaufmerksamkeit auf (Zhang (2008), vgl. auch Abbildung 2.8 unten), korreliert allerdings nicht mit kognitiver Ablenkung (Krüger, 2007). Pilutti und Ulsoy zeigen in ihren gemeinsamen Veröffentlichungen (1995), (1997) und (1999) außerdem, dass ein Tracking der lateralen Spurposition Aussagen über den Müdigkeitszustand des Fahrers ermöglicht.

Voraussetzung für die Bestimmung des Fahrerzustandes auf Basis der Spurhaltegüte ist allerdings ein Lane Tracking System, welches beispielsweise gleichzeitig die Grundlage für einen Spurverlassenswarner (vgl. Abschnitt 3.1.2) oder ein Heading Control System<sup>6</sup> bilden kann.

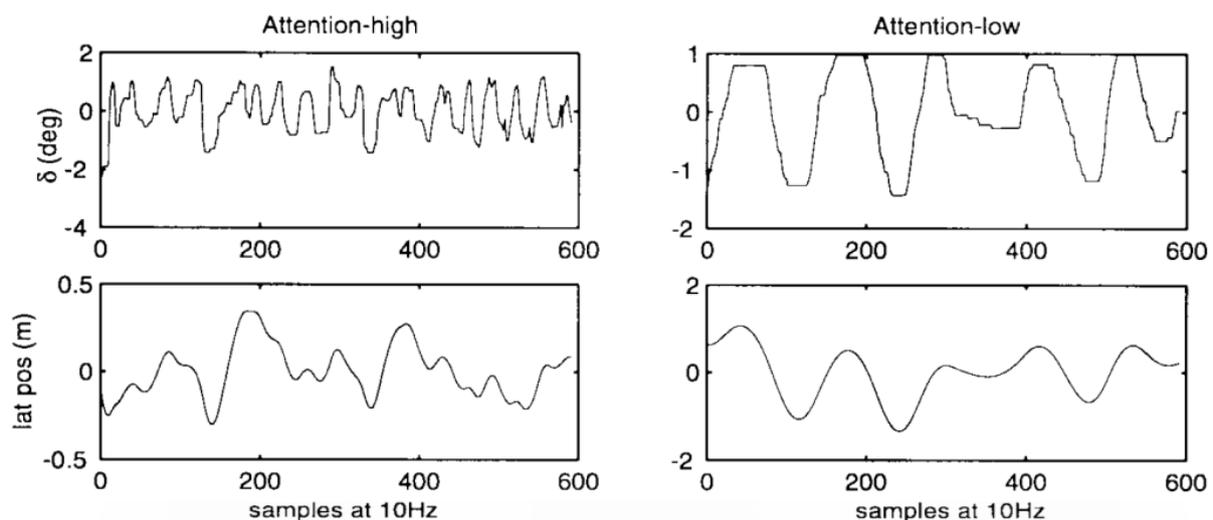


Abbildung 2.8: Auswirkung von Unaufmerksamkeit auf das Lenkverhalten (oben) und die Spurposition (unten), (Pilutti, 1999)

<sup>6</sup> Ein Heading Control (HC) System ist eine Weiterentwicklung des Spurverlassenswarners. Droht ein Fahrzeug die Fahrspur zu verlassen, greift HC aktiv in die Lenkung ein und steuert das Fahrzeug zurück in die Fahrspur.

### **Lenkverhalten**

Ein weiterer Ansatz zur Detektion des Fahrerzustandes auf der Grundlage von Fahrparametern ist die Auswertung des Lenkverhaltens (Chen (2001) und King et al. (1998)). Wie in Abbildung 2.8 links oben zu sehen ist, weist der zeitliche Verlauf des Lenkwinkels im Zustand hoher Aufmerksamkeit viele kleine, kurze Ausschläge auf. Bei geringer Aufmerksamkeit nehmen diese sogenannten Mikrokorrekturen stetig ab, die Ausschläge werden seltener, dafür aber deutlich größer. Vorteil dieses Verfahrens ist es, dass keine aufwändige Zusatzsensorik notwendig ist, sofern ein ausreichend genauer Lenkwinkelsensor mit einer Mindestauflösung von ca.  $0,1^\circ$  vorhanden ist.

### **Abstandsverhalten**

Ähnlich wie die Spurhaltung ist auch das Abstandsverhalten zum vorausfahrenden Verkehr ein guter Indikator für die aktuelle Aufmerksamkeit des Fahrers (McCall, 2004). Belz (2000) hat das Abstandsverhalten im Zusammenhang mit der Fahrermüdigkeit untersucht und kommt zu dem Schluss, dass dies einen sehr aussagekräftigen Parameter darstellt, um zwischen geringer Müdigkeit und einem hohen Grad an müdigkeitsbedingter Unaufmerksamkeit zu unterscheiden.

Blaschke et al. (2007) zeigen darüberhinaus, dass alleine anhand des Abstandsverhaltens eine Manöverprädiktion hinsichtlich einer Überholabsicht oder eines bevorstehenden Abbiegevorgangs möglich ist.

Ist ein ACC-System (vgl. Abschnitt 3.1.1 Abstandsregeltempomat – ACC) im Fahrzeug vorhanden, ist für die Überwachung des Abstandsverhaltens keine zusätzliche Sensorik notwendig. Der ACC-Radarsensor liefert dafür ausreichend genaue Distanzinformationen.

### **Reaktionszeit**

Eine weitere Möglichkeit, Informationen über den aktuellen Fahrerzustand zu erlangen, ist die Messung von Reaktionszeiten des Fahrers. Summala et al. (1998) zeigen, dass eine deutlich längere Reaktionszeit für die Betätigung der Bremse als Reaktion auf ein voraus verzögerndes Fahrzeug im Falle von visueller Ablenkung charakteristisch ist.

In Schmitt (2005) und Zhang et al. (2008) wird zeitlich gesehen einen Handlungsschritt zuvor angesetzt und die Reaktionszeit sowie das Verhalten beim „Vom-Gas-Gehen“ (engl. ART – Accelerator Release Time) betrachtet. Zhang et al. (2008) belegen in ihrer Studie eine gute Korrelation zwischen visueller Ablenkung und der ART. Schmitt und Färber (2005) demonstrieren, dass schon anhand der Reaktionszeit und der Art und Weise des „Vom-Gas-Gehens“ mit Hilfe von Fuzzy Logic außerdem erkennbar ist, ob eine Gefahrenbremsung erfolgt oder es sich um eine normale Bremsung handelt.

### **Bedienverhalten**

Die Erkennung von Ablenkung durch tertiäre Fahraufgaben, also nicht-fahrtbezogene Nebenaufgaben, liefern ebenfalls Informationen über den Aufmerksamkeitszustand des Fahrers. Saurat (2007) untersucht die Ablenkung bei der Bedienung von fahrzeuginternen Infotainment-Systemen und kommt zu dem Schluss, dass solche Bedienhandlungen einen guten Indikator für eine potentielle Unaufmerksamkeit des Fahrers darstellen, präzise Rückschlüsse auf die visuelle Ablenkung jedoch nicht zulassen. Da Bedieneingriffe im Wesentlichen die Motorik des Fahrers zusätzlich beanspruchen, liefern sie somit eine gute Möglichkeit zur Quantifizierung der motorischen Ablenkung.

Voraussetzung bei diesem Ansatz ist, dass Bedieneingaben über eine entsprechende Sensorik im Fahrzeug erfassbar sind. Bei so genannten „nomadic devices“ (z.B. PDAs und Mobiltelefone) dürfte sich dies allerdings schwer realisieren lassen und zeigt damit auch die Grenzen dieses Ansatzes auf.

An dieser Stelle ist anzumerken, dass bei zunehmender Automatisierung der Fahraufgabe, also dem Einsatz von „ersetzenden Assistenzsystemen“ (vgl. Krüger et al. (2007)), die entsprechenden Parameter aus dem Fahrverhalten nicht mehr oder nur noch sehr eingeschränkt für eine Fahreraufmerksamkeitseinschätzung zur Verfügung stehen. Fährt ein Fahrer beispielsweise mit aktiviertem Abstandsregeltempomaten (vgl. Kapitel 3.1.1 - ACC) und Spurhalteassistent (engl. Heading Control) sind keine Aussagen anhand des Längs- und Querführungsverhaltens im Hinblick auf die Fahreraufmerksamkeit mehr möglich.

Krüger et al. (2007) weisen in ihrer Literaturanalyse außerdem darauf hin, dass eine Online-Erkennung des Fahreraufmerksamkeitszustandes allein aus Fahrparametern sich als sehr schwierig erweisen könnte. Als Gründe dafür werden die großen interindividuellen Unterschiede im Fahrverhalten verschiedener Personen sowie das Fehlen des für eine hinreichend gute Detektion immens wichtigen, mit dieser Messmethode aber nur unzureichend erfassbaren Situationskontextes aufgeführt.

Im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit sollen nur noch die videobasiert und berührungslos erfassbaren Parameter Blickrichtung und Kopforientierung betrachtet werden. Besondere Bedeutung hat dabei die Kopforientierung, da diese Messgröße mit relativ geringem technischen Aufwand videobasiert ermittelt werden kann. Hintergrund der Fokussierung auf diesen Parameter Kopforientierung ist dabei das Ziel, ein Konzept zu entwickeln, welches möglichst seriennah in einem PKW (vgl. Kapitel 3.3.3 Versuchsfahrzeug), alleine unter Verwendung eines monokamerabasierten Fahrerbeobachtungssystems, umsetzbar ist. Indirekte auf Fahrparametern basierende Ansätze sowie

intrusive Messverfahren werden dabei nicht weiter verfolgt, wurden aber innerhalb dieses Teilkapitels der Vollständigkeit halber kurz aufgeführt.

## **2.8 Fahreraufmerksamkeit und Fahrerassistenz - Formen der Adaption**

In diesem Abschnitt soll darauf eingegangen werden, wie Informationen über den Fahreraufmerksamkeitszustand in einem Kraftfahrzeug Verwendung finden können. In Kopf (2005) wird in diesem Zusammenhang als übergeordnetes Ziel die Optimierung des Fahrerzustandes hinsichtlich besserer Fahrleistung genannt. Demnach kann auf Basis des detektierten Fahrerzustandes einzelnen FAS „zu größerer Effizienz oder Akzeptanz“ (Kopf, 2005) verholfen werden. Darüberhinaus ergeben sich weitere Möglichkeiten der Nutzung der Fahrerzustandsinformationen. Diese lassen sich in Anlehnung an Kopf (2005) wie folgt gliedern:

### **1. Direktes Zustandsfeedback an den Fahrer**

Der Fahrer kann beispielsweise beim Erreichen eines kritischen Müdigkeitslevels gewarnt werden. Ebenso sind Warnungen bei visueller Ablenkung vom vorausfahrenden Verkehr sowie beim Eintreten von Sekundenschlaf denkbar.

### **2. Beeinflussung einer Nebenaufgabe (tertiären Fahraufgabe)**

Die Interaktion mit Infotainmentsystemen (Navigationssystem, Radio, Telefon...) im Fahrzeug könnte im Falle von detektierter Unaufmerksamkeit verändert werden. In Färber (2005) wird diesbezüglich ein sog. Informationsmanager vorgestellt, der Informationen, welche Nebenaufgaben betreffen, nur an den Fahrer weitergibt, wenn es die Verkehrssituation bzw. das aktuelle Fahrmanöver zulässt. Zukünftig könnte die Fahreraufmerksamkeit als weiteres Regelkriterium in den Informationsmanager mit einbezogen werden. Bedienungen des Navigationssystems könnten beispielsweise nur zugelassen werden, wenn die primäre Fahraufgabe nicht die volle (visuelle) Aufmerksamkeit benötigt.

### **3. Beeinflussung der (primären) Fahraufgabe**

Eine Möglichkeit zur Einflussnahme auf die primäre Fahraufgabe ist die Anpassung von Fahrerassistenzsystemen (FAS) an die veränderliche Fahraufmerksamkeit. So könnte beispielsweise die Übernahmeaufforderung eines ACC-Systems (vgl. auch Abschnitt 3.1.1) bei erkannter Ablenkung vorgezogen und dem Fahrer somit mehr Zeit zum reagieren eingeräumt werden (vgl. Kapitel 7.1 und Trefflich (2008a)).

In Buld und Krüger (2002) wird darauf hingewiesen, dass den Fahrer ersetzende Assistenz z.B. durch ein ACC oder Heading Control System (dt. Spurhaltesystem) mit einer Reduktion der Fahreraufmerksamkeit einhergeht. Im Gegensatz dazu führt ein den Fahrer warnendes Assistenzsystem, wie z.B. ein Spurverlassenswarner (vgl. Abschnitt 3.1.2), zu einer Steigerung der Aufmerksamkeit. Demnach könnte es sinnvoll sein, unter bestimmten Randbedingungen verschiedene Systemausprägungen in Abhängigkeit vom aktuellen Fahreraufmerksamkeitszustand für ein FAS zu implementieren.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit soll der Fokus auf die Adaption von FAS in Abhängigkeit von der Fahreraufmerksamkeit gelegt werden. Die aufgeführten Adaptionmöglichkeiten unter 1. und 2. werden dabei nicht weiter betrachtet.

Wie bereits in Kapitel 1.1 erläutert, leisten FAS einen wichtigen Beitrag zur Erhöhung der Sicherheit im Straßenverkehr. Dies wird dadurch erreicht, dass diese Systeme (z.B. ABS und ESP) in kritischen Situationen autonom in die Fahrdynamik eingreifen und den Fahrer bei der Erfüllung der Stabilisationsaufgabe (vgl. Abschnitt 2.1) unterstützen. Systeme wie ACC (vgl. Abschnitt 3.1.1) oder LDW (vgl. Abschnitt 3.1.2) entlasten den Fahrer darüberhinaus bei der Fahrzeugführung (vgl. Abschnitt 2.7.2) und warnen den Fahrer in Gefahrensituationen. Der Systemaspekt „Warnung bei Gefahrensituation“ berücksichtigt momentan jedoch nicht den aktuellen Zustand des Fahrers. Eine Warnung muss unter normalen Umständen derart erfolgen, dass der Fahrzeugführer ausreichend zeitlichen Spielraum erhält, eine kritische Situation zu überblicken und gegebenenfalls entsprechend zu reagieren. Die Länge des notwendigen Spielraumes variiert von Person zu Person, zum Beispiel aufgrund unterschiedlicher Erfahrung. Ein sehr wichtiger Gesichtspunkt jedoch, welcher alle Personengruppen gleichermaßen betrifft, ist deren aktuelle Aufmerksamkeit. Ist ein Fahrer vom Verkehrsgeschehen abgelenkt und folgt diesem nicht mehr aktiv, so muss ihm zum Einschätzen einer auftretenden kritischen Situation ein deutlich größerer Zeitraum zur Verfügung gestellt werden (vgl. Abschnitt 2.6.1). Ohne eine aktive Erkennung der Fahreraufmerksamkeit ist z.B. eine variable Parametrierung des Warnzeitpunktes eines FAS jedoch nicht möglich. Ein Warnsystem, welches hauptsächlich für den Fall der Unaufmerksamkeit ausgelegt wird, würde den aufmerksamen Fahrer zu häufig unterbrechen – die Warnschwellen wären zu niedrig. Das System würde dadurch an Glaubwürdigkeit einbüßen, auch der Achtungseffekt einer berechtigten Warnung wäre deutlich reduziert (vgl. auch Krüger (2007) und Terkes (2007)).

### 2.8.1 Warnzeitpunkt

Der Zeitpunkt, zu dem eine Warnung bezüglich einer potentiell kritischen Situation erfolgt, ist also immanent wichtig für die Akzeptanz eines solchen Assistenzsystems. Gleichzeitig bestimmt dieser auch wesentlich den Sicherheitsgewinn, denn nur wenn eine Warnung rechtzeitig erfolgt, bleibt dem Fahrer ausreichend Zeit zu reagieren.

Zhang und Smith (2004) schlagen beispielsweise vor, verschiedene Zeitintervalle, in denen die visuelle Ablenkung des Fahrers anhand seiner Blickrichtung bestimmt wird, in Abhängigkeit von dem zu adaptierenden System oder der jeweiligen Umweltsituation zu implementieren. Als relativ kurzes Zeitfenster wird hier eine Größenordnung von 3 - 5s genannt. Längere Intervalle könnten nach Meinung der Autoren im Bereich von 15 - 60s liegen. Längere Messintervalle für die Bestimmung der Aufmerksamkeit und eine darauf aufbauende Adaption erscheinen sinnvoll für Systeme, die im Bereich der Daueraufmerksamkeit (vgl. Tabelle 2.3) angesiedelt sind bzw. im Bereich monotoner, lang andauernder Fahraufgaben unterstützen. Bei Detektion einer akuten Gefahrensituation in der Fahrzeugumwelt durch ein Assistenzsystem, muss im Allgemeinen jedoch schnell reagiert werden und die kurzfristigen Aufmerksamkeitsaspekte sind in diesem Fall für eine mögliche Adaption des FAS von Bedeutung.

### 2.8.2 Warnintensität

Parallel zur Adaption von FAS-Warnzeitpunkten ist auch eine Änderung der Intensität der Warnung denkbar. Je nach Kritikalität könnte dabei beispielsweise die Lautstärke oder die Dauer eines Warnsignals angepasst werden. Eine solche Anpassung ist allerdings nur sinnvoll, wenn das mögliche Zeitintervall, in dem zuverlässig eine Warnung erfolgen kann, hinreichend groß ist. Es erscheint beispielsweise nicht zweckmäßig, im Bereich unterhalb von 1s vor dem Eintritt einer kritischen Situation die Intensitätslevel einer Warnung skalierbar zu gestalten. Ein derart kurzes Zeitfenster liegt im Bereich der Reaktionszeit des Fahrers. Innerhalb dessen ist es nur schwer möglich verschiedene Kritikalitätslevel zu unterscheiden.

| <b>Warnzeitpunkt</b>     | <b>Benefit</b> |
|--------------------------|----------------|
| ⇒ früher                 | ⇒ Sicherheit   |
| ⇒ später                 | ⇒ Akzeptanz    |
| <b>Warnintensität</b>    |                |
| ⇒ stärker                | ⇒ Sicherheit   |
| ⇒ schwächer              | ⇒ Akzeptanz    |
| <b>Warnunterdrückung</b> |                |
|                          | ⇒ Akzeptanz    |

Tabelle 2.8: Möglichkeiten der Adaption von FAS

### 2.8.3 Warnunterdrückung

In Buld und Krüger (2002) wird darauf hingewiesen, dass aktuelle FAS noch eine relativ hohe Fehlerrate aufweisen. Der Fahrer ist so gezwungen, zwischen dem Überwachen des FAS und dem selbständigen Fahren hin und her zu wechseln. Gerade bei der Monitoring Aufgabe ist es störend, wenn zu häufig Fehlwarnungen auftreten, z.B. wenn ein System zu früh eine Warnung ausgibt bzw. eine Situation kritischer einschätzt, als diese sich tatsächlich für den Fahrer darstellt. Auch hier könnte durch eine Verknüpfung mit der Fahreraufmerksamkeit eine Verbesserung erzielt werden. Warnungen könnten unterdrückt oder verzögert werden, wenn sichergestellt werden kann, dass das kritische Ereignis sich im Aufmerksamkeitsfokus des Fahrers befindet und von ihm wahrgenommen wird.

Die Tabelle 2.8 gibt einen kurzen Überblick über die Möglichkeiten, die für eine Anpassung der Warnstrategien von aktuellen Fahrerassistenzsystemen im Hinblick auf die Fahreraufmerksamkeit denkbar sind.

### 2.8.4 Akzeptanz

Der Akzeptanzaspekt soll im Folgenden noch einmal weiter untergliedert werden. Für die Akzeptanz eines Assistenzsystems ist es wichtig, dass dieses in seiner Funktionalität transparent gestaltet ist. Dies gilt im Besonderen für FAS, die auf der Führungsebene (vgl. Abschnitt 2.1) unterstützen bzw. entlasten. Immer dann, wenn ein Assistenzsystem in seiner Funktionalität für den Fahrer spürbar ist, muss sichergestellt sein, dass die Aktionen und Reaktionen nachvollziehbar sowie das weitere Verhalten vorhersagbar sind. Irritation beim Verhalten eines FAS oder im Falle der Ausgabe einer Warnung können den Nutzen hinsichtlich der Erhöhung der Verkehrssicherheit schnell in das Gegenteil verkehren. Gerade teilautonom agierende Systeme sollten durch eine hohe Zuverlässigkeit gekennzeichnet sein. Assistenzsysteme, die nur in kritischen Situationen eingreifen, setzen ein hohes Vertrauen in die Technik voraus (Buld, 2002). Darüberhinaus sollte ein FAS möglichst nicht in den normalen Fahrbetrieb, außerhalb einer kritischen Situation, eingreifen. Das führt in der Folge häufig dazu, dass der Fahrer sich bevormundet oder gemaßregelt fühlt und das Assistenzsystem in seiner Funktionalität ablehnt. Penka (2001) weist darauf hin, dass die Akzeptanz eines FAS umso geringer ist, je stärker die Einflussnahme für den Fahrer spürbar ist, wenn er den Eingriff gleichzeitig als nicht gerechtfertigt empfindet.

### **2.8.5 Verhaltensadaption**

Abschließend sei noch auf die in der Literatur im Zusammenhang mit der Entwicklung innovativer FAS häufig auftauchenden Phänomene der Risikokompensation und Risikohomöostase eingegangen (Blawat (2007) und Dornhöfer (2000)). Bei der Einführung von neuen Sicherheitssystemen kommt es beim Fahrer häufig zu einer Verhaltensanpassung. „Der durch eine technische Änderung mögliche Sicherheitsgewinn kann [...] ganz oder teilweise dadurch verloren gehen, dass die Fahrer die Änderung in der Weise nutzen, dass sie ihre eigenen, teilweise nicht sicherheitskonformen Ziele noch besser zu realisieren suchen“ (Weller, 2004).

Färber und Färber (2004) beschreiben die Auswirkungen von Informations- und Assistenzsystemen auf das Fahrerverhalten folgendermaßen: Der Fahrer „nutzt also, grob gesprochen, die Entlastung, die durch Informationsmanagement oder Unterstützungssysteme geboten werden, für eine Veränderung seines Verhaltens.“ Jeder Fahrer akzeptiert unbewusst ein gewisses Risiko in seinem Leben. Es konnte beispielsweise gezeigt werden, dass, wenn ein Auto durch den Einbau von ABS sicherer wird, der Fahrer automatisch dazu tendiert, schneller zu fahren und dichter auf andere Fahrzeuge aufzufahren (Sagberg, 1997). Der Fahrer geht also mit dem Fahrzeug, das ein zusätzliches Plus an Sicherheit durch das vorhandene ABS aufweist, im Allgemeinen ein höheres Risiko ein als bei einem Fahrzeug ohne ABS.

Dieser Effekt sollte bei der Auslegung neuer adaptiver FAS Berücksichtigung finden, da sich sonst der Sicherheitsbonus durch eine beispielsweise bessere, fahreradaptive Gestaltung schnell in das Gegenteil verkehren kann.

# 3 Systemanalyse – Fahrerassistenz- und Messsysteme

## 3.1 Fahrerassistenzsysteme

Im folgenden Teilkapitel wird ein kurzer Überblick über moderne Fahrerassistenzsysteme (FAS) gegeben, sowie der Versuch einer Einteilung dieser in 4 Kategorien unternommen. Daran schließt sich eine detailliertere Betrachtung des Assistenzsystems Adaptive Cruise Control (ACC - vgl. Abschnitt 3.1.1) sowie des Spurverlassenswarners (engl. Lane Departure Warning System, vgl. Abschnitt 3.1.2) der Firma Audi an. Die Warnkonzepte dieser beiden FAS werden im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit prototypisch an eine veränderliche Fahreraufmerksamkeit angepasst.

### Warnende oder informierende Systeme

FAS dieser Kategorie warnen oder informieren den Fahrer. Sie stellen dabei Informationen zur Verfügung, die der Fahrer meist nicht mit seinen Sinnen oder nicht schnell genug aufnehmen kann. Solche Systeme sind etwa „Night Vision“ zum besseren Sehen bei Nacht, basierend auf einem IR<sup>7</sup>-Sensor oder ein Kollisionswarner, basierend auf einem Radar- oder Ultraschallsensor. Ebenfalls ist ein Spurwechselassistent (SWA) sowie ein Spurverlassenswarner (engl. LDW, vgl. Abschnitt 3.1.2) dieser Kategorie zuzuordnen. Die genannten FAS unterstützen somit im Wesentlichen bei der Führungsaufgabe (vgl. Abschnitt 2.1).

### Unterstützende Systeme

Ein Teil dieser Systeme hilft dem Fahrer bei z.B. sekundären Fahraufgaben, wie dem rechtzeitigen Einschalten der Fahrzeugbeleuchtung durch die Adaptive Light Control. Ein Einparkassistent sowie ein System zur Kolonnenorganisation bieten Entlastung bei der Aufgabe der Fahrzeugführung. Ein Bremsassistent hilft bei der Stabilisierungsaufgabe (vgl. Abschnitt 2.1). Er erkennt Notbrems-situationen und verzögert das Fahrzeug innerhalb dieser mit der optimalen Bremswirkung.

### Pre-Crash Systeme

Die unter diesem Begriff zusammengefassten Systeme dienen dem Zweck, sowohl Insassen, als auch etwaige Unfallgegner, möglichst vor Schaden zu bewahren. Dies geschieht durch frühzeitiges

---

<sup>7</sup> IR = infrarot

Erkennen einer Gefahrensituation und Auslösen von Crash vorbereitenden Maßnahmen. So können z.B. die Insassen in eine optimale Position gebracht werden, um eventuelle Schäden zu vermindern oder gar zu vermeiden. Diese Systeme sind nicht direkt einer Fahraufgabe, wie unter Abschnitt 2.1 definiert, zuzuordnen.

#### **Autonome Systeme**

Dieser Kategorie lassen sich das Anti Blockier System (ABS), die Antriebs Schlupfregelung (ASR) sowie das Elektronische Stabilitätsprogramm (ESP) zuordnen. Diese FAS agieren auf der Stabilisierungsebene. Sie unterstützen den Fahrer, ohne dass sie explizit bedient werden müssen. Ihre Regelmechanismen laufen darüberhinaus meist mit einer Präzision und Geschwindigkeit ab, die von keinem Fahrer äquivalent erreicht werden könnte.

Ein weiterer Teil der autonomen FAS wird in der Literatur auch unter dem Begriff „Ersetzende Assistenz“ beschrieben (Buld, 2002). Darunter sind Systeme wie das ACC oder der Spurhalteassistent (engl. HC – Heading Control System) zusammengefasst. Sie nehmen dem Fahrer beispielsweise Teile der Führungsaufgabe vollständig ab. Der Fahrer muss sich, wenn diese Systeme aktiv sind, lediglich um deren Überwachung kümmern. In dem Bericht von Buld und Krüger (2002) wird weiterhin der unterschiedliche Einfluss von ersetzenden Assistenzsystemen und warnenden Assistenzsystemen auf die Fahreraufmerksamkeit herausgestellt. Es wird gezeigt, „dass ersetzende Assistenz mit einer Reduktion der Aufmerksamkeit einhergeht“ (Buld, 2002). Dieser Effekt ist allerdings bei den heute verfügbaren ersetzenden Systemen wie z.B. einem ACC relativ gering. Der Fahrer wird gerade bei aktuellen ACC-Systemen durch eine relativ hohe Fehlerrate zu einem häufigen Wechsel zwischen Systemüberwachung und Sequenzen nicht automatisierten Fahrens gezwungen, was der Aufmerksamkeitserhaltung zu Gute kommt.

Die Zustandsübergänge vom automatisierten zum nicht automatisierten Fahren sind verbunden mit einem Anforderungswechsel hinsichtlich der Fahreraufmerksamkeit. Die Studien von Nilsson (1995) belegen, dass gerade bei diesen Zustandsübergängen mit einer längeren Reaktionszeit zu rechnen ist. Bei z.B. zukünftigen ACC-Generationen mit höherer Systemverfügbarkeit erscheint es daher sinnvoll, Zustandsübergangswarnungen fahreraufmerksamkeitsangepasst auszulegen.

Im Gegensatz zu den ersetzenden Systemen führt die warnende Assistenz im Allgemeinen zu einer Aufmerksamkeitssteigerung. Treten jedoch, wie beispielsweise bei aktuell verfügbaren Systemauslegungen des LDW-Systems, häufig Warnungen auf, auch in Verkehrssituationen, in denen der Fahrer diese als unnötig empfindet, führt das dazu, dass das System von den Versuchspersonen zwar

als sinnvoll, für den „Normalverkehr“ aber als wenig akzeptabel eingestuft wird (Buld, 2002). Genau dieser Kritikpunkt bietet Potential für eine Verbesserung des warnenden LDW-Systems durch eine fahreraufmerksamkeitsadaptive Systemauslegung.

### 3.1.1 Abstandsregeltempomat – ACC

#### 3.1.1.1 Funktionsweise

Bei dem bereits in den voranstehenden Kapiteln mehrfach erwähnten Abstandsregeltempomat (engl. Adaptive Cruise Control - ACC) handelt es sich um eine Weiterentwicklung des herkömmlichen Tempomaten. Während bei einer gewöhnlichen Geschwindigkeitsregelanlage (Tempomat) eine eingestellte Sollgeschwindigkeit automatisch gehalten wird, berücksichtigt ein ACC-System neben der gesetzten Sollgeschwindigkeit auch den Abstand zu einem vorausfahrend Fahrzeug. Holt man beispielsweise ein langsamer fahrendes Fahrzeug ein, so regelt das ACC automatisch die Geschwindigkeit herunter, sodass das eigene Fahrzeug einen vom Fahrer eingestellten geschwindigkeitsabhängigen Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug einhält. Ein ACC-System zielt damit auf eine Erhöhung des Fahrkomforts bei längeren Autobahn- oder Schnellstraßenfahrten ab und soll den Fahrer bei der Längsführungsaufgabe des Fahrzeugs entlasten. In der im Abschnitt 3.1 vorgeschlagenen Taxonomie ist das ACC-System der Gruppe autonomer ersetzender Assistenzsysteme zuzuordnen.



**Abbildung 3.1: Das ACC-System, der Abstandsregeltempomat (KfzTech, 2008)**

In aktuellen Fahrzeugen, wie beispielsweise auch dem bei den verschiedenen Versuchsreihen zum Einsatz gekommenen Audi Q7 (vgl. Abschnitt 3.3.3), kann die Sollgeschwindigkeit in einem Bereich von 30 - 200km/h durch den Fahrer eingestellt werden.

Um die aktuelle Geschwindigkeit als Sollgröße festzulegen, genügt ein einfacher Tastendruck an einem Wahlhebel, der am Lenkradstock angebracht ist. Die Wunschgeschwindigkeit, welche im

Kombiinstrument angezeigt wird, kann mit diesem Wählhebel nach oben und unten korrigiert werden. Die Abstandsregulierung zum vorausfahrenden Verkehr erfolgt mit Hilfe eines aktiven Radarsensors im vorderen Teil des Automobils. Der geschwindigkeitsabhängige Abstand wird auch als Zeitlücke bezeichnet und kann vom Fahrer in 4 verschiedenen Stufen angepasst werden. Entfernt sich das Hindernis aus dem Fahrweg, so beschleunigt das ACC wieder automatisch auf die vorher vom Fahrer gewählte Geschwindigkeit. Sollte der Fahrer mit der automatischen Regelung unzufrieden sein, kann er jederzeit durch betätigen des Gaspedals die Geschwindigkeit erhöhen. Lässt er das Pedal wieder los, geht ACC wieder in den Regelbetrieb über. Eine Betätigung des Bremspedals deaktiviert das System solange, bis der Fahrzeugführer es wieder aktiv schaltet.

Für die Verzögerung steht dem ACC-System aus Sicherheitsgründen nicht die volle Bremskraft des Fahrzeugs zur Verfügung. Reicht die maximal mögliche Verzögerungsleistung des ACC-Systems nicht aus, um beispielsweise auf einen kurz vor dem eigenen Fahrzeug eingescherten Verkehrsteilnehmer zu reagieren, erfolgt eine nach Dringlichkeit gestufte optische wie auch akustische Übernahmeaufforderungswarnung (engl. Take Over Request – TOR). Dieser Take Over Request fordert den Fahrer auf, wieder selbst vollständig die Kontrolle über das Fahrzeug zu übernehmen und auf die gegebenenfalls kritische Situation zu reagieren.

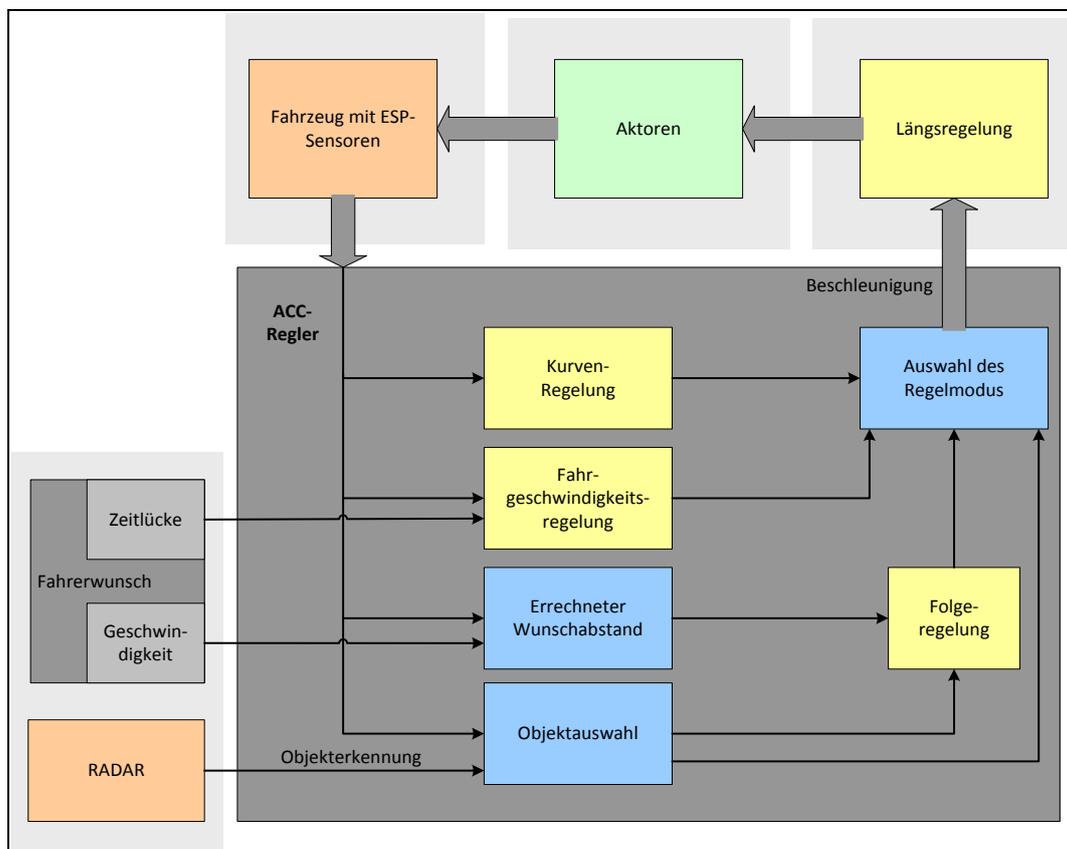


Abbildung 3.2: Datenfluss im ACC-System von den Sensoren (orange), über die Auswertung (blau), die Regelung (gelb) und die Aktoren (grün), (Bosch, 2002)

Um die beschriebene Funktionalität zu gewährleisten, muss das ACC-System in der Lage sein, eines oder mehrere, sich vor dem eigenen Fahrzeug befindliche, Objekte und deren fahrdynamische Eigenschaften sicher zu erfassen. Es muss außerdem die Dynamik des eigenen Fahrzeugs berücksichtigen und die für die Abstands- und Geschwindigkeitsregelung notwendigen Aktuatoren korrekt ansteuern sowie Informationen an den Fahrzeugführer ausgeben. Um diese Funktionalität sicherzustellen, sind eine Reihe von physikalischen Messverfahren sowie zahlreiche Regelalgorithmen implementiert. Diese steuern die Reaktionen des eigenen Fahrzeugs auf die errechnete Fahrsituation.

Im Folgenden wird aus Gründen der Übersichtlichkeit nur auf die Funktionsweise des Algorithmus zur Generierung von ACC-Übernahmeaufforderungen (engl. Take Over Request – TOR) detaillierter eingegangen. Der im anschließenden Teilkapitel 3.1.1.2 beschriebene und in serienmäßig verfügbaren ACC-Systemen vorhandene Funktionsumfang, wird im Rahmen dieser Arbeit in einer prototypischen Umsetzung um die Berücksichtigung des Aspektes der Fahreraufmerksamkeit ergänzt (vgl. Kapitel 7.1).

Für weiterführende Informationen, ACC-Systeme betreffend, sei an dieser Stelle auf Schichtl (2007) und Bosch (2002) verwiesen.

#### **3.1.1.2 Take Over Request – TOR**

Die Funktionsweise des Algorithmus zur Generierung einer Übernahmeaufforderung lässt sich in zwei Stufen beschreiben:

##### **1. Stufe**

Diese Stufe wird auch als Validierung bezeichnet. Hierbei findet eine Überprüfung statt, ob die grundlegenden Voraussetzungen für die Ausgabe einer TOR-Warnung vorliegen. Die Kriterien dafür sind, ob sich das Fahrzeug bewegt, ob ein Zielobjekt detektiert wurde und ob sich das ACC-System in einem aktiven Zustand befindet. Eine Warnung wird nur als eventuell erforderlich eingestuft, wenn diese drei Kriterien gleichzeitig erfüllt sind.

##### **2. Stufe**

Innerhalb dieser Stufe werden auf Basis eines Kennfeldes aus der vom Fahrer gesetzten Zeitlücke und der Geschwindigkeit des Fahrzeugs der Sollabstand und die aktuelle Sollbeschleunigung berechnet. Auf der Grundlage dieser Parameter kann der Zeitpunkt für die Ausgabe einer Übernahme-

aufforderung bestimmt werden. Damit tatsächlich eine Warnung ausgelöst wird, muss eines der 3 im Folgenden erläuterten Kriterien erfüllt sein (vgl. Abbildung 3.3).

**Absolutes Abstandskriterium**

Dieses Kriterium ist immer dann erfüllt, wenn der Abstand zu einem Zielobjekt die Grenze von 7m unterschreitet. Wurde die Grenze unterschritten, so wird eine TOR-Warnung ausgelöst und erst wieder deaktiviert, wenn der Abstand wieder größer 7m ist.

**Relatives Abstandskriterium**

Für dieses Kriterium wird die aktuelle Relativgeschwindigkeit bezogen auf das Zielobjekt in Verbindung mit dem Restabstand, sowie der vom Fahrer gesetzten Sollabstand betrachtet. Anhand einer Geradengleichung (vgl. Abbildung 3.4) wird bestimmt, ob das System noch in der Lage ist, im Rahmen seiner Grenzen die Situation auszuregeln. Die Steigung der Geraden ermittelt sich aus dem Sollabstand und einigen Systemkonstanten. Wie bereits erläutert ist der Sollabstand wiederum von der eingestellten Zeitlücke und der aktuellen Geschwindigkeit abhängig. Mit steigender Eigengeschwindigkeit verringert sich der Anstieg der Geraden (vgl. Abbildung 3.4). Bei größeren Relativgeschwindigkeiten wird das Kriterium früher erreicht.

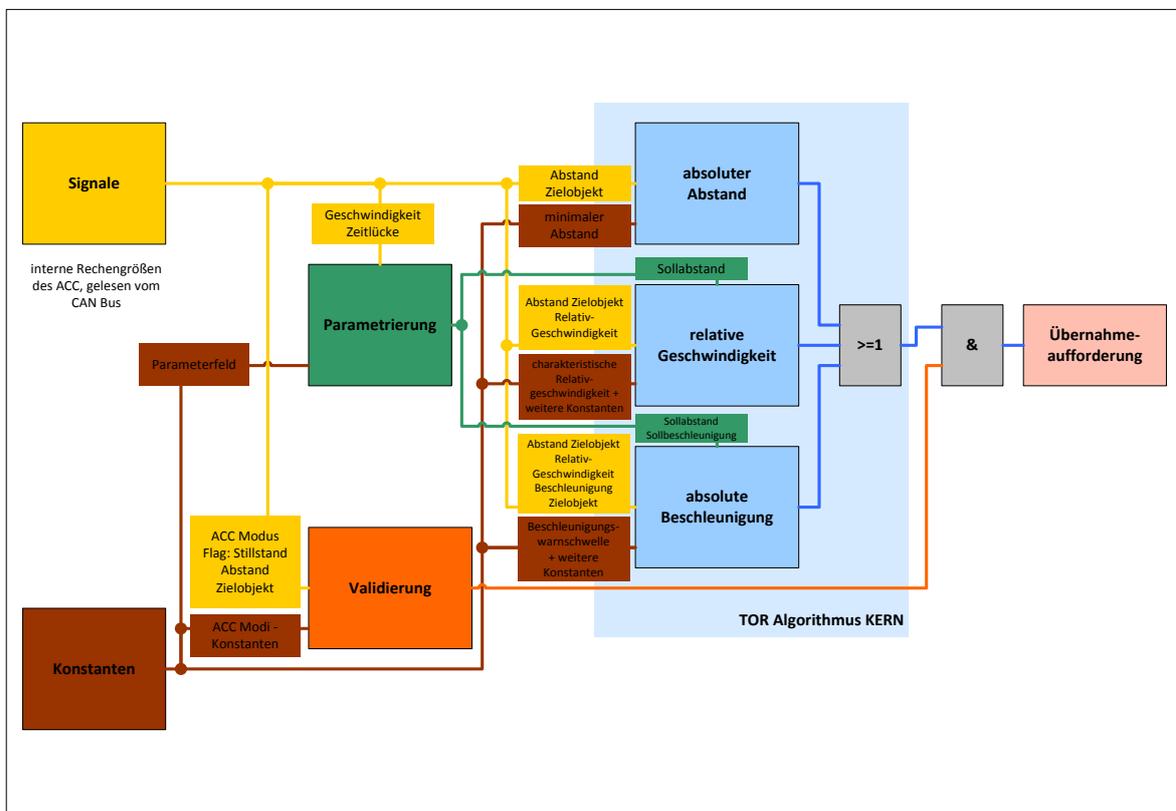


Abbildung 3.3: Der TOR-Algorithmus (Schichtl, 2007)

### Absolutes Beschleunigungskriterium

Für dieses Kriterium werden 3 interne Zwischenergebnisse berechnet, die am Ende UND-verknüpft werden, um eine TOR-Warnung auszulösen. Als erstes wird überprüft, ob sich das Zielobjekt auf das eigene Fahrzeug zubewegt. Dies wird anhand der Relativgeschwindigkeit bestimmt. Als zweites Teilkriterium wird untersucht, ob die Sollbeschleunigung des eigenen Fahrzeugs größer als die erlaubte Maximalverzögerung ist. Diese Sollbeschleunigung wird fortlaufend vom ACC-Steuergerät jeweils für die aktuelle Fahrsituation berechnet. Als drittes wird bestimmt, ob der vorhandene Sicherheitsabstand zum bremsen mit der dem ACC-System maximal möglichen Verzögerung noch ausreichend ist.

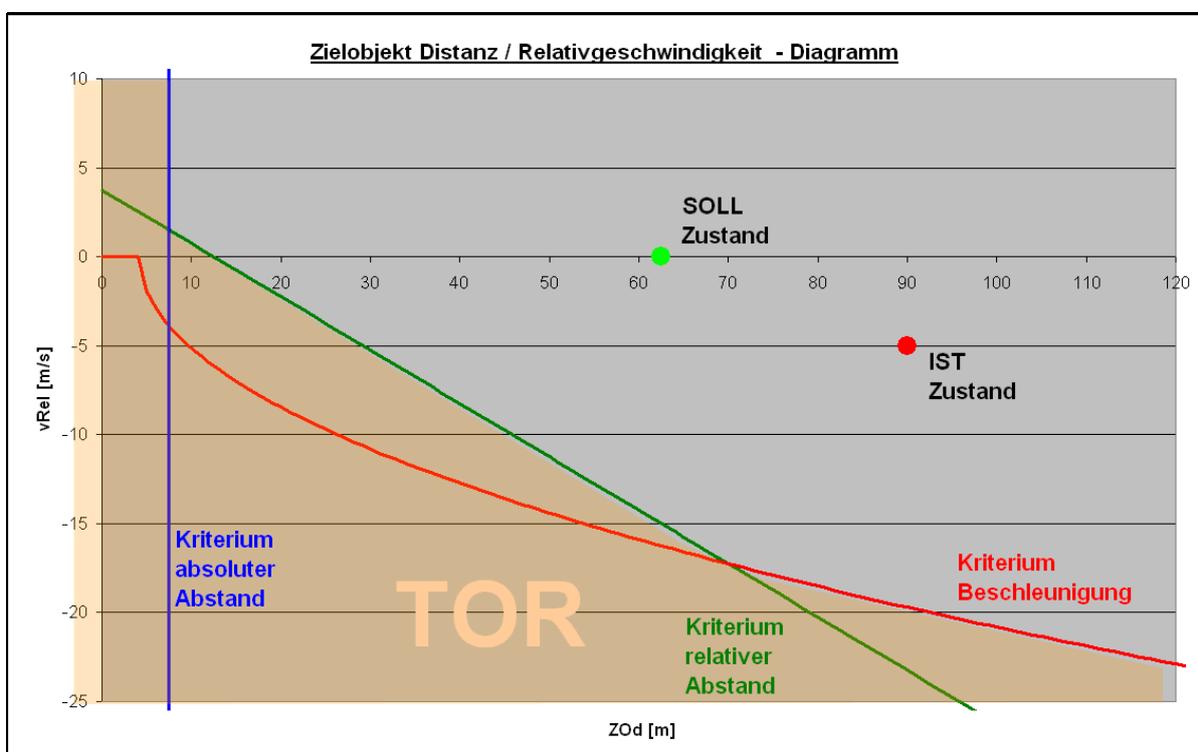


Abbildung 3.4: Die drei Auslösekriterien einer ACC-Übernahmeaufforderung (Schichtl, 2007)

Wurde eine Take Over Request aufgrund einer der beschriebenen Kriterien ausgelöst, erfolgt eine Ansteuerung des Kombiinstrumentes. Dieses gibt dann eine akustische und optische Warnung an den Fahrer aus.

## 3.1.2 Spurverlassenswarner – LDW

### 3.1.2.1 Funktionsweise

Das Lane Departure Warning System (LDW) ist ein Fahrerassistenzsystem, das auf eine Reduzierung der Unfälle, verursacht durch ein unbeabsichtigtes Verlassen der Fahrspur abzielt. Es ist in seiner aktuellen Ausprägung (vgl. Kapitel 3.3.3 zum Versuchsfahrzeug) für den Straßenverkehr außerhalb geschlossener Ortschaften konzipiert und arbeitet ab einer Geschwindigkeit von 65km/h. Ist der Spurverlassenswarner aktiv, so wird der Fahrer bei jedem unbeabsichtigten Verlassen der Fahrspur durch ein Warnsignal im Vorfeld darauf hingewiesen. Ob ein Spurverlassen unbeabsichtigt erfolgt, wird dabei alleine aus dem Nichtsetzen des Blinkers abgeleitet. Wird der Blinker hingegen betätigt, werden für einen Zeitraum von ca. 3 Sekunden keine LDW-Warnungen ausgegeben. Um die beschriebene Funktionalität zu ermöglichen, vermisst der Spurverlassenswarner kontinuierlich die relative Position des Fahrzeugs zwischen der rechten und der linken Spurmarkierung. Dafür wird mit einem vorausschauenden Videosystem der Bereich vor dem Fahrzeug erfasst und mit Hilfe von Bildverarbeitungsalgorithmen die Lage der Spurmarkierungen bestimmt (vgl. Abbildung 3.5).

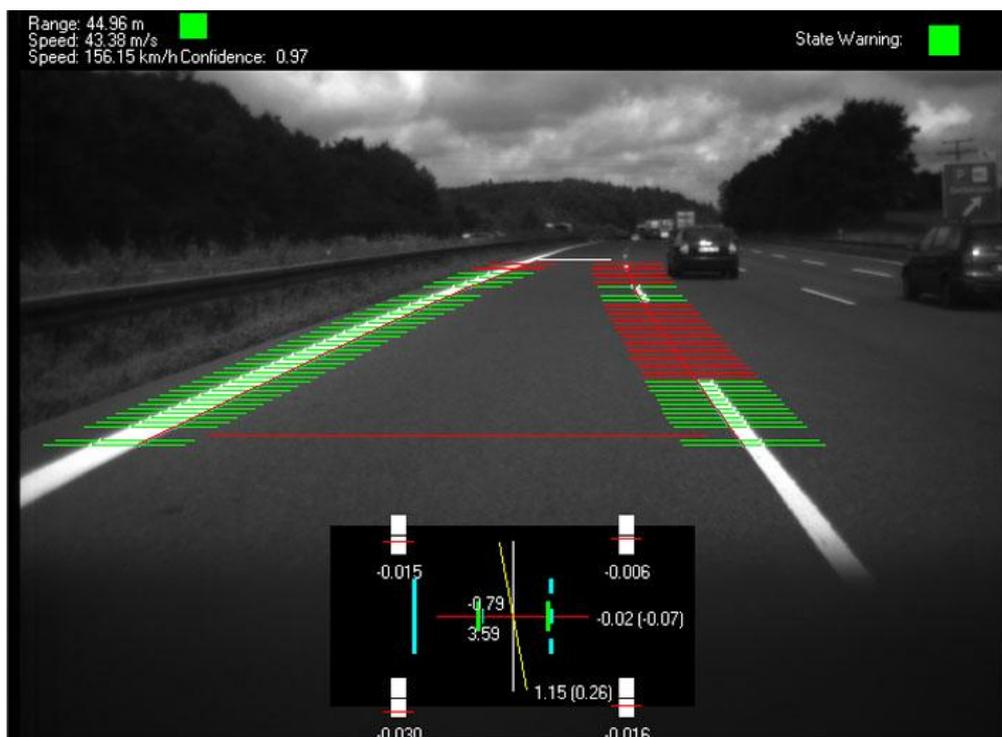


Abbildung 3.5: Funktionsweise des Spurverlassenswarner (Schnörer, 2004)

Die folgende Tabelle 3.1 gibt einen Überblick über die wesentlichen Parameter, die aus der Bildverarbeitung gewonnen werden.

| Name                         | Beschreibung   |
|------------------------------|--|
| Gierwinkelfehler             | Winkel zwischen Fahrzeuglängsachse und Fahrbahntangente          |
| Querabweichung               | Laterale Abweichung des Fahrzeuges zur Fahrspurmitte             |
| Spurbreite                   | Abstand zwischen den beiden erkannten Fahrspurmarkierungen       |
| Krümmung                     | Krümmung der erkannten Fahrspur(Kehrwert des Fahrspurradius)     |
| Breite Spurmarkierung links  | Breite der auf der linken Seite erkannten Spurmarkierung         |
| Breite Spurmarkierung rechts | Breite der auf der rechten Seite erkannten Spurmarkierung        |
| Abstand                      | Abstand des Vorderrades zur am nächsten gelegenen Spurmarkierung |
| Güte                         | Qualität der Fahrspurerkennung                                   |

**Tabelle 3.1: Messgrößen aus der Bildverarbeitung des LDW-Systems**

Im Folgenden soll lediglich auf die verschiedenen Warnmodi eines LDW-Systems, wie diese aktuell in einem Serien PKW, zum Beispiel einem Audi Q7 (vgl. Kapitel 3.3.3) umgesetzt sind, eingegangen werden. Aufbauend auf diesen unterschiedlichen Systemkonfigurationen wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit ein prototypisches LDW-Warnkonzept, in dem neben den manuell voreingestellten Warnschwellen auch die Fahreraufmerksamkeit Berücksichtigung findet, erläutert und diskutiert (vgl. Kapitel 7.2).

Für weiterführende Literatur zum Thema LDW sei an dieser Stelle auf Terkes (2007), Saupe (2005), Schnörer (2004) sowie das Internet (Continental Automotive, 2007) verwiesen.

#### 3.1.2.2 Warnmodi

Wie bereits erwähnt hat der Fahrer bei aktuellen LDW-Systemen die Möglichkeit, den Zeitpunkt, zu dem eine Warnung im Vorfeld eines drohenden Fahrspurverlassens ausgegeben wird, individuell anzupassen. Es steht eine Auslegung für einen **frühen**, einen **späten** und einen **adaptiven Warnzeitpunkt** zur Verfügung. Die bevorzugte Variante kann im Fahrzeugbedienmenü je nach den persönlichen Wünschen des Fahrers ausgewählt werden (Saupe, 2005). Das veränderbare Systemverhalten resultiert auf einer unterschiedlichen Parametrierung der zugrundeliegenden Algorithmen. Diese basieren im Wesentlichen auf zwei Kriterien, zum Einen ein abstandsabhängiger DLC Ansatz (engl. Distance to Line Crossing), zum Anderen ein zeitabhängiger TLC Ansatz (engl. Time to Line Crossing, vgl. auch Abbildung 3.6). Für jede der beiden Ausprägungen werden die beiden Kriterien DLC und TLC anders parametrisiert bzw. in Relation unterschiedlich gewichtet. Im Falle der „frühen“ und „adaptiven“ Parametrierung werden beide Kriterien berücksichtigt. Bei einem „späten“ Warnzeitpunkt wird lediglich der ortsabhängige DLC Ansatz herangezogen und der Fahrer erst bei

Unterschreitung des Mindestabstandes oder bei Überfahren der Fahrbahnmarkierung gewarnt (Schnörer, 2004). Das Prinzip beider Auslegungskriterien ist in der folgenden Abbildung 3.6 noch einmal schematisch dargestellt.

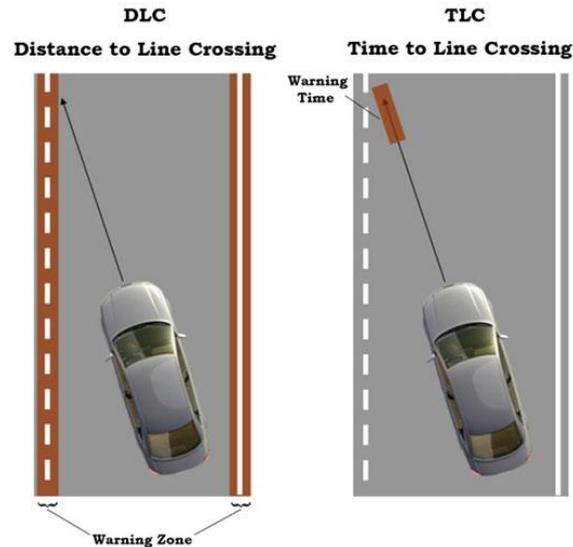


Abbildung 3.6: Gegenüberstellung DLC- und TLC-Kriterium in Anlehnung an (Saupe, 2005)

Zur Berechnung des Distance to Line Crossing Kriteriums wird auf jeder Fahrspurseite eine Warnzone definiert (vgl. Abbildung 3.6). Verlässt das Fahrzeug den dazwischen liegenden unkritischen Fahrspurbereich und dringt in eine der Warnzonen ein, wird eine Warnung in Form einer Lenkradvibration (vgl. Kapitel 3.3.3 zu Versuchsfahrzeug) ausgelöst.

Die dem Time to Line Crossing Kriterium zugrundeliegende Zeitschwelle wird unter Annahme eines linearen Fahrspurmodells berechnet (Zimmermann, 2002). Dabei wird davon ausgegangen, dass im Moment der Berechnung die Fahrspur und die Fahrtrichtung des Fahrzeugs durch eine Gerade beschrieben werden kann.

Tabelle 3.2 gibt abschließend noch einmal einen Überblick über die Berücksichtigung der beiden Warnkriterien in Abhängigkeit der eingestellten LDW-Systemkonfiguration.

| Warnzeitpunkt | DLC-Kriterium | TLC-Kriterium | Parameter zur Berechnung des TLC-Schwellwertes |
|---------------|---------------|---------------|--|
| früh          | X             | X             | const. = 1s                                    |
| adaptiv       | X             | X             | variabel                                       |
| spät          | X             | -             | keine  |

Tabelle 3.2: Auslegung der verschiedenen LDW-Warnmodi

## 3.2 Stand der Technik – Aufmerksamkeitsüberwachung

In Kapitel 2.7 „Möglichkeiten der Fahrerzustandserkennung“ wurde bereits auf verschiedene Messprinzipien und entsprechende Sensoren eingegangen. Doch welche Konzepte finden aktuell tatsächlich im Hinblick auf eine Aufmerksamkeitserkennung, auch in Bereichen außerhalb der Automobiltechnik, Anwendung?

Zum Beispiel ist im Bereich der Eisenbahnfahrzeuge die sogenannte Sicherheitsfahrerschaltung standardisiert (DIN VDE Norm 0119-207-5, 2004). Diese besteht in der Regel aus einem Pedal oder Taster, welcher in bestimmten Zeitabständen losgelassen und wieder gedrückt werden muss. Dadurch erhält das System die Rückmeldung, dass der Lokführer aufmerksam ist und noch reagieren kann. Bleibt eine Reaktion nach ca. 30 Sekunden aus, warnt das System den Lokführer zuerst optisch, einige Sekunden später auch akustisch. Erfolgt trotzdem keine Betätigung der Sicherheitsfahrerschaltung, wird der Zug aus Sicherheitsgründen zwangsgebremst und angehalten. Diese auch als Totmannschalter bekannte Einrichtung ist in deutschen Schienenfahrzeugen nach Unfällen, verursacht durch eingeschlafene Lokführer, gesetzlich vorgeschrieben.

Auch in der zivilen Luftfahrt wird an Systemen zur Aufmerksamkeitsüberwachung von Piloten gearbeitet. Das Electronic Navigation Research Institut in Tokyo präsentierte beispielweise im Jahr 2000 ein Forschungssystem, das auf der Grundlage von biologischen Faktoren wie Blutdruck und Herzfrequenz (vgl. Kapitel 2.7.1.2 „Intrusiv erfassbare Parameter“) sowie des Sprechverhaltens des Piloten Rückschlüsse auf dessen Müdigkeitszustand erlaubt (Heyn, 2000). Darüberhinaus werden bei Piloten im Rahmen ihrer umfangreichen Ausbildung standardisierte Verhaltensweisen trainiert, um die Daueraufmerksamkeit (vgl. Kapitel 2.3.3), gerade bei monotonen Langstreckenflügen, hoch zu halten, aber auch die selektive und geteilte Aufmerksamkeit (vgl. Kapitel 2.3.1 und 2.3.2) in Gefahrensituationen gezielt auf die relevanten Instrumente und Umweltinformationen lenken zu können (Hinkelbein, 2007).

Die verschiedenen Ansätze zur Aufmerksamkeitserkennung aus den Bereichen der Luftfahrt und Schienenfahrzeuge sowie die in Kapitel 2.7 diskutierten Möglichkeiten zur Fahrerzustandserkennung hauptsächlich aus dem Automobilbereich verdeutlichen noch einmal die Komplexität als auch die Vielschichtigkeit des Problems. Durch die hohe Diversität der Anforderungen an den Fahrer bei der Erledigung der Fahraufgabe (vgl. Kapitel 2.1) sowie aus Gründen der Praktikabilität, ist es jedoch nicht ohne weiteres möglich, die Ansätze zur Aufmerksamkeitsüberwachung bei Piloten oder Lokführer in den PKW-Bereich zu übernehmen.

Aus diesem Grund setzen verschiedene PKW-Hersteller auf andere, in erster Linie indirekte Messverfahren, um Informationen über die Fahreraufmerksamkeit zu erlangen (vgl. Kapitel 2.7.2).

So hat zum Beispiel Volvo im Jahr 2008 als erster PKW-Hersteller ein System, basierend auf einer Verfolgung der Spurposition, als Weiterentwicklung eines LDW-Systems (vgl. Kapitel 3.1.2), auf dem europäischen Markt eingeführt. Das sogenannte Driver Alert Control System erkennt den Einfluss von Müdigkeit oder Unkonzentriertheit auf die Spurhaltung (Querführung) des Fahrzeugs (Grünweg, 2007). Ist ein kritischer Grad von Unaufmerksamkeit erreicht, warnt das System den Fahrer durch eine Textmeldung im Kombiinstrumentendisplay sowie durch ein Akustiksignal (Autosieger.de, 2008).

Ein Jahr später, Anfang 2009, folgte Daimler mit einem System in der neuen Mercedes E-Klasse, welches sich im Wesentlichen auf den Lenkwinkel stützt, aber auch andere Parameter, wie die Tageszeit, die Fahrdauer, den Seitenwind sowie die Fahrbahnbeschaffenheit für eine Einschätzung des Aufmerksamkeitszustandes des Fahrers mit berücksichtigt (Daimler Communications, 2007). „Ist der Fahrer müde, erscheint ein optisches Warnsignal in Form einer Kaffeetasse im Display, zusätzlich erklingt ein Warnton“ (Autobild.de, 2007).

Kritisch betrachtet, lässt sich darüberhinaus Johannsen (2008) wie folgt zitieren: „Streng genommen, ist kein Verfahren bekannt, das eine experimentelle Überprüfung der [...] Aufmerksamkeitsverteilung erlaubt. Eine immerhin grobe Analogie liefern Blickbewegungsmessungen“ (vgl. auch Johannsen (1979), (1983) und (1993)). Allerdings sind mit dem heutigen Stand der Technik Systeme, die Blickbewegungsmessungen hinreichend exakt in Kraftfahrzeugen ermöglichen, in der Großserienproduktion noch nicht mit vertretbarem Aufwand umsetzbar.

Gleichwohl bietet Lexus als weltweit erster Automobilhersteller in seinen LS-Modellen seit dem Jahr 2007 ein erstes serienmäßiges Fahrerassistenzsystem auf dem europäischen Markt an, das neben weiteren Sensoren auch eine Fahrerbeobachtungskamera beinhaltet (Lexus, 2009). Auf die Funktionsweise dieses Systems soll im folgenden Teilkapitel 3.2.1 noch einmal detaillierter eingegangen werden.

#### **3.2.1 Das Pre-Crash Safety System der Firma Lexus**

Bei dem Pre-Crash Safety System der Firma Lexus handelt es sich um ein integrales Sicherheitssystem, das sowohl externe Sensoren (Radar und Stereovideokamera) als auch eine Innenraumkamera zur Fahrerüberwachung beinhaltet. Das System ist dafür konzipiert, drohende Kollisionen im Vorfeld mit Hilfe der vorausschauenden Sensoren zu erkennen und verschiedene aktive Sicherheitssysteme im Fahrzeug zu aktivieren, um dadurch die Unfallfolgen für die PKW-Insassen zu reduzieren. Bei Erkennen eines bevorstehenden potentiellen Crashes werden

beispielsweise die Sicherheitsgurte gestrafft und das Bremssystem auf eine Notbremsung vorbereitet (The Auto Channel, 2006).

Um darüberhinaus einem visuell abgelenkten Fahrer (das bedeutet in diesem konkreten Fall, das Fahrergesicht ist nicht in Richtung des vorausfahrenden Verkehrs orientiert) vor einer drohenden Kollision mehr Zeit zum Reagieren einräumen zu können, wird zusätzlich die Ausrichtung des Fahrergesichtes mit Hilfe einer Fahrerbeobachtungskamera überwacht. Wird von den externen vorausschauenden Sensoren ein potentiell bevorstehender Crash detektiert und zusätzlich vom Gesichtsfeldmonitorsystem ein abgewandter Fahrer erkannt, werden ein optisches und ein akustisches Warnsignal ausgegeben. Erfolgt trotzdem keine Gesichtszuwendung in Richtung des vorausfahrenden Verkehrs, wird ein Bremsruck ausgelöst. Die akustische und optische Warnung kann bei einem so als abgelenkt erkannten Fahrer um bis zu 1,5s vorgezogen erfolgen (vgl. den Punkt „vorgezogenes Timing“ in Abbildung 3.7). Die prinzipielle Funktionsweise des Lexus Pre-Crash Safety Systems ist in dem folgenden Diagramm dargestellt (vgl. Abbildung 3.7). Dabei ist der Zeitpunkt des potentiellen Crashes ( $t_0$ ) am rechten Bildrand abgetragen.

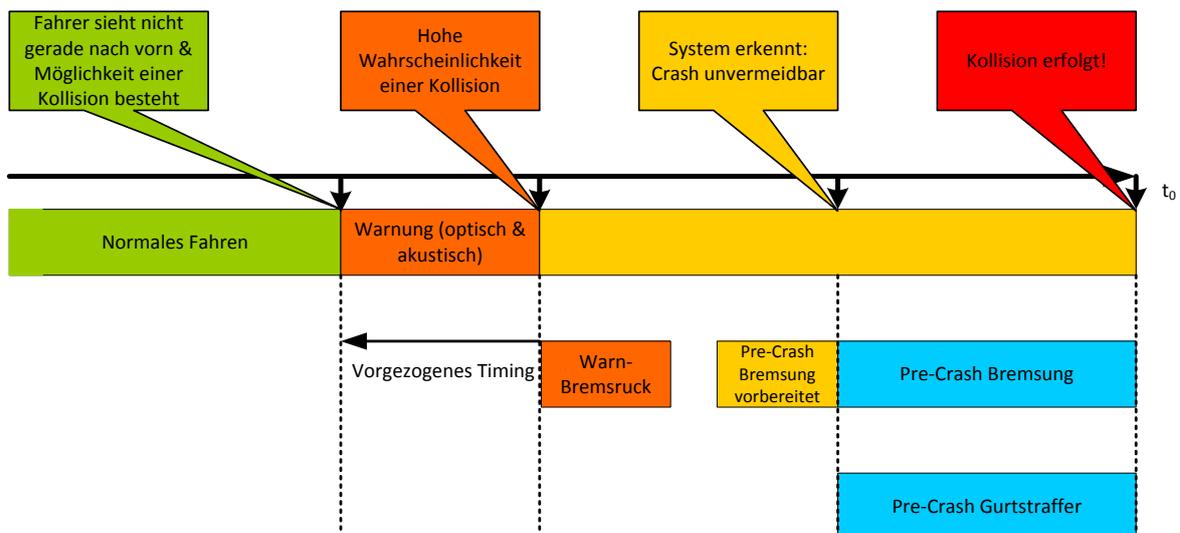


Abbildung 3.7: Funktionsweise des Pre-Crash Safety Systems

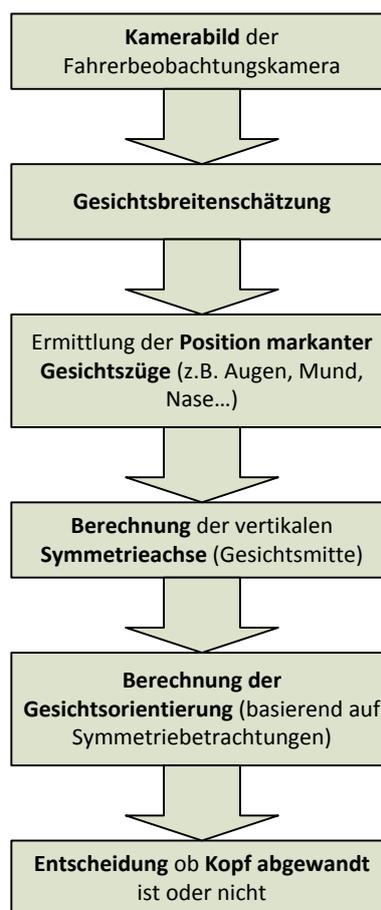
Die zur Fahrerüberwachung zum Einsatz kommende im Infrarotbereich empfindliche CCD<sup>8</sup>-Kamera ist zusammen mit 6 IR-LEDs in einem Gehäuse auf der Lenksäulenverkleidung montiert (vgl. Abbildung 3.8).

<sup>8</sup> engl. Charge Coupled Device



**Abbildung 3.8: Anordnung der Fahrerbeobachtungskamera beim Lexus Pre-Crash Safety System  
(The Auto Channel, 2006)**

Aus den mit der Lenksäulenkamera aufgezeichneten Bildinformationen ermittelt das System auf Basis einer vertikalen Symmetriebetrachtung typischer Gesichtsbestandteile (linkes vs. rechtes Auge, Mund, Nase etc.), ob das Fahrergesicht nach vorne ausgerichtet ist oder nicht. Die Funktionsweise des Gesichtsfeldmonitors ist in der folgenden Abbildung 3.9 dargestellt (Lexus, 2009).



**Abbildung 3.9: Funktionsweise des Gesichtsfeldmonitors des Lexus Pre-Crash Safety Systems**

Soweit veröffentlicht, wird die Gesichtsorientierung bei diesem System nur anhand einer Symmetrieberechnung ermittelt und alleine auf Grundlage dieser entschieden, ob eine Pre-Crash-Warnung um bis zu 1,5s vorgezogen wird. Eine detaillierte Berechnung der Kopforientierung, wie bei dem im Rahmen dieser Arbeit für eine Adaption von FAS Warnungen verwendeten Driver State Sensor (vgl. Kapitel 3.3.1.1), scheint nicht zu erfolgen. Auch deutet die zum Einsatz kommende relativ einfache CCD-Kamera in Verbindung mit der geringen Anzahl von IR-Beleuchtungsdioden auf einen stark eingeschränkten Erfassungsbereich des Fahrerkopfes und somit auf eine reduzierte Funktionalität gegenüber des in Kapitel 6 dieser Arbeit vorgestellten Ansatzes hin.

## **3.3 Prototypen- und Messsysteme für die Versuchsdurchführung**

### **3.3.1 Kamerasysteme**

Innerhalb des voranstehenden Kapitels 3.2 „Stand der Technik – Aufmerksamkeitsüberwachung“ sowie in den Kapiteln 2.6 und 2.7 wurde bereits mehrfach darauf eingegangen, dass Blickrichtung und Kopforientierung gut geeignete Parameter darstellen, anhand derer der visuelle Aufmerksamkeitsfokus des Fahrers ermittelt werden kann. Außerdem wurde in Kapitel 2.7.1.1 erläutert, dass beide Parameter Blick- und Kopfrichtung sich in Fahrsituationen am praktikabelsten für einen potentiellen serienmäßigen Einsatz in PKW auf Basis eines kamerabasierten Fahrerbeobachtungssystems bestimmen lassen.

Im Folgenden wird nun auf die im Rahmen dieser Arbeit in den verschiedenen Versuchsreihen verwendeten Kamerasysteme eingegangen sowie deren Funktionsweise erläutert.

#### **3.3.1.1 Der Driver State Sensor (DSS) – ein Monokamerasystem**

In den Versuchsreihen in den Kapiteln 4, 5, 6 und 7 fand der Driver State Sensor (DSS) der australischen Firma Seeing Machines (2008) Verwendung.

Das DSS System besteht aus einer im Infrarotbereich arbeitenden Videokamera mit IEEE1394-Schnittstelle, 2 IR-LED-Beleuchtungsmodulen und einem embedded Car PC (Pentium M 1,8 GHz, 1GB RAM, 1GB Flashspeicher) für die Bildverarbeitung.

Die verwendete Kamera hat als Bildaufnehmer einen monochromen CCD Sensor mit einer Auflösung von 640 x 480 Pixel. Die Aufnahmezeit beträgt 60fps (Bilder pro Sekunde). Die einzelnen Systemkomponenten sind in Abbildung 3.10 dargestellt.



**Abbildung 3.10: Das DSS Systems bestehend aus zwei IR-Beleuchtungsmodulen (links & rechts, rot hervorgehoben), einer IR-Kamera (Mitte, grün hervorgehoben) und einem embedded Car PC (unten), (Seeing Machines, 2008)**

Der Driver State Sensor ermöglicht Messungen der Kopfposition und -orientierung in 3D-Koordinaten sowie, aufgrund der hohen Framerate von 60Hz, des Lidschlusses. Das System verfügt über eine Ethernet Schnittstelle, über die eine Echtzeitübertragung der Messwerte an andere Mess- und Aufzeichnungssysteme mittels UDP<sup>9</sup> ermöglicht wird.

Die Funktionsweise, das zugrundeliegende Koordinatensystem sowie die gelieferten Datenformate werden in Abschnitt 3.3.1.3 erläutert.

### **3.3.1.2 Das Face Lab System – ein Mehrkammersystem**

Für die Versuchsreihe zur Untersuchung der Korrelation von Blickrichtung und Kopforientierung in Kapitel 5 kam neben dem monokularen DSS System das Stereokamerasystem Face Lab ebenfalls von der australischen Firma Seeing Machines (2008) zum Einsatz. Das Face Lab System wird, ebenso wie der Driver State Sensor, von Seeing Machines als kommerzielles Produkt vertrieben und bietet die Möglichkeit sowohl Messungen des Blick- als auch des Kopforientierungsverhaltens im Kraftfahrzeugbereich in Echtzeit durchzuführen.



**Abbildung 3.11: Das Face Lab System (Seeing Machines, 2008)**

---

<sup>9</sup> User Datagram Protocol – verbindungsloses Netzwerkprotokoll

Das in Abbildung 3.11 dargestellte Face Lab System besteht aus 2 Infrarotkameras (Auflösung 640 x 480 Pixel), die über eine Fire Wire Schnittstelle mit einem Auswerterechner verbunden sind. Hierfür fand ein Standard Laptop (Centrino Dual Core 2x2GHz, 2GB RAM, 100GB HDD) bei der in Kapitel 5 beschriebenen Versuchsreihe Verwendung. Die Bildwiederholrate der in Echtzeit verarbeiteten Videos liegt bei 60Hz. Dadurch ist es auch mit diesem System möglich, den Lidschluss der Versuchspersonen zu detektieren und auszuwerten. Das Face Lab System verfügt analog dem DSS über eine Ethernet Schnittstelle zur Datenübertragung. Um Messungen auch während Dunkelheit zu ermöglichen, kann das System optional mit 2 aktiven Infrarotbeleuchtungsmodulen ausgestattet werden.

#### **3.3.1.3 Funktionsweise**

Beide Systeme (DSS und Face Lab) bieten mit der mitgelieferten Auswertesoftware eine Echtzeit Bildverarbeitung. Die implementierten Algorithmen bestimmen anhand des Videobildes des Fahrerkopfes dessen Kopfposition, die Kopforientierung sowie den Augenöffnungsgrad. Das Stereokamerasystem Face Lab liefert außerdem Daten zur Blickrichtung.

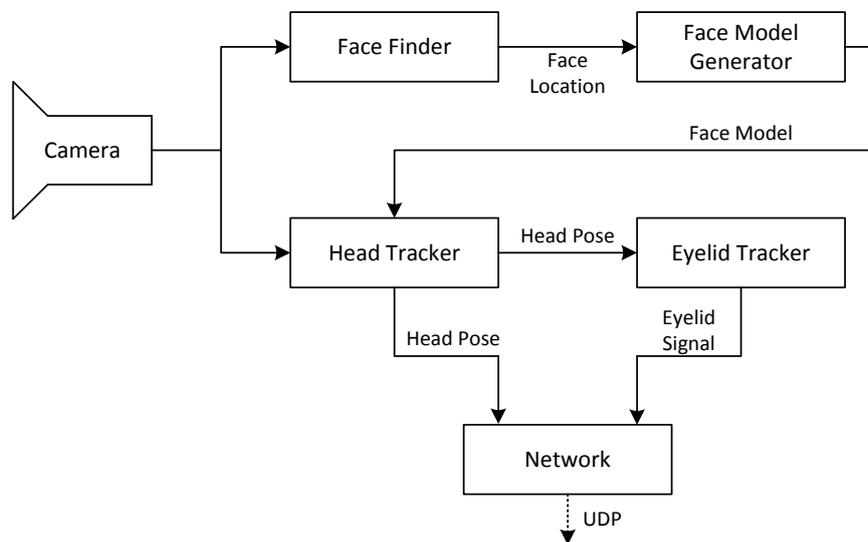
Die Erkennung eines Gesichtes im Videobild, die anschließende Bestimmung der Messgrößen, sowie eine Nachverfolgung (Tracking) des sich bewegenden Kopfes und der Augen, kann in zwei Phasen zusammengefasst werden:

##### **Initialisierungsphase**

Basierend auf einer Modellvorstellung des Kopfes wird das Gesicht dabei durch ein abstraktes, dreidimensionales Kopfmodell mit festen Bestandteilen wie Augen, Nase und Mund, welche eine feste Anordnung und Lage im Gesicht besitzen, beschrieben. Diese Vorgaben werden ergänzt durch variable Elemente, wie die Abstände dieser einzelnen Bestandteile, die je nach Kopfpose variieren. Die Parametrierung dieser variablen Elemente und somit die Anpassung der Kopfmodellform erfolgt individuell auf die jeweils vorliegenden Bilddaten. Nach bestmöglicher Anpassung des Kopfmodells an die vorliegenden Bilddaten erfolgt eine statistische Bewertung des eingepassten Modells. Das Ergebnis der Bewertung wird über den Parameter Kopfsignalgüte als Prozentwert ausgegeben. Bei unzureichender Kopfsignalgüte erfolgt nach einer bestimmten Zeit automatisch eine Reinitialisierung. Sobald das Kopfmodell erfolgreich eingepasst wurde, stehen die Informationen zur Kopfposition und Kopforientierung zur Verfügung. Für die Genauigkeit der Kopfposition gibt der Hersteller ein Intervall von +/- 1mm, für die Kopfrotation von +/-1° für beide Kamerasysteme an.

Neben den Angaben zur Kopfposition und –orientierung liefert das Face Lab System parallel dazu Informationen zur aktuellen Blickrichtung der jeweiligen Versuchsperson. Dafür bestimmt die

Software die Mittelpunkte der Iris von beiden Augen und berechnet daraus zusammen mit der jeweils aktuellen Kopforientierung die Blickrichtung mit einer Genauigkeit von  $\pm 3^\circ$ .



**Abbildung 3.12: Funktionsweise des Driver State Sensors (DSS) der Firma Seeing Machines (2008)**

#### Trackingphase

In der Trackingphase erfolgt für jedes Frame eine erneute, stark reduzierte Bestimmung der Lage des Kopfmodells. Aufgrund der hohen Framerate von 60Hz und der Tatsache, dass der Kopf sich nur mit einer bestimmten maximalen Geschwindigkeit bewegen und somit seine Lage im Kamerabild auch nur mit einer bestimmten Schrittweite verändern kann, ist der Suchbereich von einem Frame zum nächsten stark eingeschränkt. Weiterhin erfolgt eine Bewegungsschätzung, wo sich der Kopf im nächsten Frame wahrscheinlich befindet. Dies reduziert den Berechnungsaufwand und ermöglicht die Echtzeitfähigkeit.

Als Ergebnis des Tracking liefert die Bildverarbeitungssoftware Daten mit 60Hz zur aktuellen Kopforientierung und Kopfpositionierung sowie (bei dem Face Lab System) zur Blickrichtung. Dieser Datenstrom kann bei beiden Systemen über eine Ethernet-Schnittstelle via UDP ausgegeben werden. Die folgende Tabelle 3.3 gibt einen Überblick über die sowohl vom Face Lab als auch vom DSS ausgegebenen Parameter. In Tabelle 3.4 sind darüberhinaus die Blickrichtungparameter dargestellt, die sich mit dem Face Lab System bestimmen lassen. Beide Tabellen stellen nur einen Teil der von beiden Systemen erfassbaren Messgrößen dar. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde sich hierbei auf die Parameter beschränkt, die für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuchsreihen und Berechnungen relevant sind.

### 3.3 Prototypen- und Messsysteme für die Versuchsdurchführung

Für weiterführende Informationen im Hinblick auf ähnliche Bildverarbeitungsalgorithmen, wie die den beiden Trackingsystemen zugrundeliegenden, sei an dieser Stelle auf die Veröffentlichungen von Heinzmann und Zelinsky (1997) und (1998) sowie auf Victor et al. (2001) und Longhurst (2004) verwiesen.

| Signalbezeichnung     | Einheit | Wertebereich  |
|-----------------------|---------|---------------|
| Kopfsignalgüte        | Prozent | 0 .. 100      |
| Kopfposition X        | Meter   | -0,3 .. 0,3   |
| Kopfposition Y        | Meter   | 0,0 .. 0,6    |
| Kopfposition Z        | Meter   | 0,3 .. 1,1    |
| Kopfrotation $\theta$ | Radian  | -0,78 .. 0,78 |
| Kopfrotation $\psi$   | Radian  | -0,78 .. 0,78 |
| Kopfrotation $\phi$   | Radian  | -0,78 .. 0,78 |

**Tabelle 3.3: Ausgabeparameter des DSS und des Face Lab Systems zur Kopfposition und –orientierung**

Da es sich bei dem DSS System um ein monokulares System handelt, kann die Tiefeninformation (z-Koordinate) nicht direkt aus dem Videobild ermittelt werden. Um dennoch 3 dimensionale Positionsdaten liefern zu können, wird die Tiefe anhand des interindividuell relativ konstanten Augenabstandes approximiert.

| Signalbezeichnung                  | Einheit | Wertebereich    |
|------------------------------------|---------|-----------------|
| Pupillenposition rechtes Auge in X | Meter   | -0,300 .. 0,300 |
| Pupillenposition rechtes Auge in Y | Meter   | 0,000 .. 0,600  |
| Pupillenposition rechtes Auge in Z | Meter   | 0,300 .. 1,100  |
| Pupillenposition linkes Auge in X  | Meter   | -0,300 .. 0,300 |
| Pupillenposition linkes Auge in Y  | Meter   | 0,000 .. 0,600  |
| Pupillenposition linkes Auge in Z  | Meter   | 0,300 .. 1,100  |
| Blickrotation rechtes Auge um X    | Radian  | -0,38 .. 0,38   |
| Blickrotation rechtes Auge um Y    | Radian  | -0,78 .. 0,78   |
| Blickgüte rechtes Auge             | Prozent | 0 .. 100        |
| Blickrotation linkes Auge um X     | Radian  | -0,38 .. 0,38   |
| Blickrotation linkes Auge um Y     | Radian  | -0,78 .. 0,78   |
| Blickgüte linkes Auge              | Prozent | 0 .. 100        |

**Tabelle 3.4: Blickrichtungsmessgrößen des Face Lab Systems**

In Abbildung 3.13 sind die Lagebeziehungen der drei, den beiden Fahrerbeobachtungssystemen zugrundeliegenden, Koordinatensysteme dargestellt. Die in Tabelle 3.3 und in Tabelle 3.4 zusammen-

gefassten Ausgabeparameter beider Kamerasysteme beziehen sich dabei immer auf das Weltkoordinatensystem.

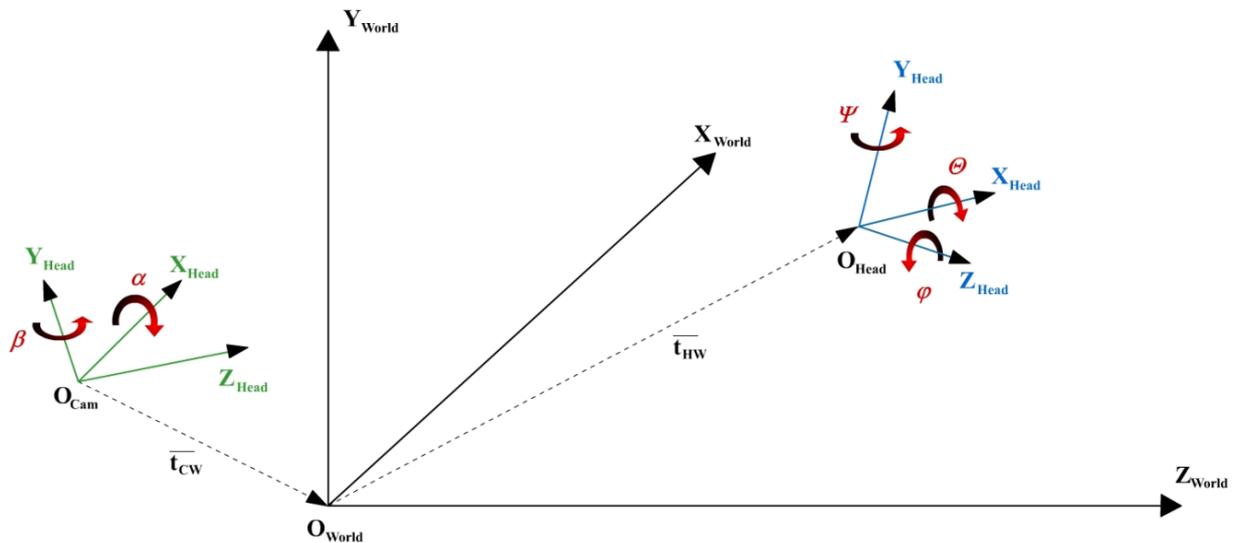


Abbildung 3.13: Beziehung zwischen Welt-, Kamera- und Kopfmodellkoordinatensystem (Trefflich, 2008a)

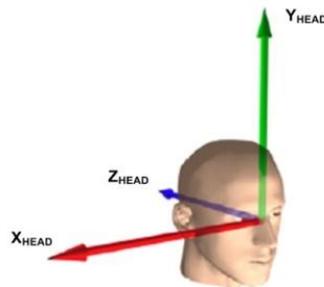
Die interne Auswertung erfolgt jedoch in einem um den Neigungswinkel  $\alpha$  und den Gierwinkel  $\beta$  rotierten Koordinatensystem. Dieses wird als Kamerakoordinatensystem bezeichnet und erlaubt es einerseits, den Fahrzeugursprung in einen beliebigen virtuellen Punkt zu legen sowie andererseits eine verkippte Einbauweise der Kamera zu kompensieren. Die beiden Verkippungswinkel werden nach abgeschlossener Montage der Systeme bestimmt und in einer Konfigurationsdatei abgespeichert. Die Transformation zwischen beiden Systemen erfolgt auf der Grundlage der folgenden Gleichung:

$$\begin{bmatrix} X_{World} \\ Y_{World} \\ Z_{World} \end{bmatrix} = R(\alpha, \beta) \cdot \begin{bmatrix} X_{Cam} \\ Y_{Cam} \\ Z_{Cam} \end{bmatrix} + \vec{t}_{CW} \quad 3.1$$

Dabei sind  $X_{World}$ ,  $Y_{World}$  und  $Z_{World}$  die Richtungskomponenten des Weltkoordinatensystems,  $X_{Cam}$ ,  $Y_{Cam}$  und  $Z_{Cam}$  die Richtungskomponenten des Kamerakoordinatensystems.  $\vec{t}_{CW}$  repräsentiert den Verschiebungsvektor und  $R$  die Rotationsmatrix zwischen den Systemen in Abhängigkeit der beiden Verkippungswinkel  $\alpha$  und  $\beta$ . Im Falle der bei dieser Arbeit verwendeten Versuchsaufbauten (vgl. Kapitel 3.3.3 Versuchsfahrzeug) stimmt der Ursprung des Weltkoordinatensystems mit dem des Kamerakoordinatensystems überein, womit  $\vec{t}_{CW}$  gleich Null ist. Der Ursprung des Weltkoordinatensystems ist im Mittelpunkt der DSS Kamera definiert und liegt damit bei der in Kapitel 5 beschriebenen Versuchsreihe in der Mitte des Abstandes beider Face Lab Kameras. Die DSS

Kamera ist mittig vor dem Fahrer montiert, dem entsprechend ist auch  $\beta$  gleich Null (vgl. Abbildung 3.16 und Abbildung 4.1). Der Winkel  $\alpha$  beträgt hingegen im zum Einsatz gekommenen Versuchsfahrzeug  $-7^\circ$  (vgl. Kapitel 3.3.3), da die Kamera in vertikaler Richtung leicht unterhalb des Fahrers angebracht und auf das Fahrergesichts ausgerichtet ist.

Zur Bestimmung der Kopfposition und –rotation wird ein weiteres Koordinatensystem eingeführt. Die Verschiebung des Kopfkoordinatensystems vom Weltkoordinatensystem ist durch den Vektor  $\vec{t}_{HW}$  definiert und der Ursprung als der Mittelpunkt der Verbindungsgeraden zwischen rechtem und linkem Augenmittelpunkt festgelegt (vgl. Abbildung 3.14).



**Abbildung 3.14: Lage des Kopfkoordinatensystems (Trefflich, 2008a)**

Die Orientierung des Kopfkoordinatensystems bezogen auf das Weltkoordinatensystem ist durch den Kopfrichtungsvektor bestimmt, welcher in die Rotationsmatrix  $R_{HW}$  eingeht. Die Lagebeziehung lässt sich durch die folgende Gleichung beschreiben:

$$\begin{bmatrix} X_{World} \\ Y_{World} \\ Z_{World} \end{bmatrix} = R_{HW}(\Theta, \Psi, \Phi) \cdot \begin{bmatrix} X_{Head} \\ Y_{Head} \\ Z_{Head} \end{bmatrix} + \vec{t}_{HW} \quad 3.2$$

Punkte im Weltkoordinatensystem werden dabei durch

$$\vec{P}_{World} = [X_{World}, Y_{World}, Z_{World}]^T \quad 3.3$$

angegeben. Punkte im Kopfkoordinatensystem durch

$$\vec{P}_{Head} = [X_{Head}, Y_{Head}, Z_{Head}]^T \quad 3.4$$

beschrieben. Dem entsprechend erfolgt die Transformation eines Punktes aus Kopfkoordinaten in Weltkoordinaten durch eine Translation um den Vektor  $\vec{t}_{HW}$  und eine Rotation beschrieben durch die folgenden Rotationsmatrizen.

$$R_{HW}(\Theta, \Psi, \Phi) = R_x(\Theta) \cdot R_y(\Psi) \cdot R_z(\Phi) \quad 3.5$$

Für die Rotation um die X-Achse gilt:

$$R_x(\Theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\Theta) & -\sin(\Theta) \\ 0 & \sin(\Theta) & \cos(\Theta) \end{bmatrix} \quad 3.6$$

Für die Rotation um die Y-Achse gilt:

$$R_y(\Psi) = \begin{bmatrix} \cos(\Psi) & 0 & \sin(\Psi) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\Psi) & 0 & \cos(\Psi) \end{bmatrix} \quad 3.7$$

Für die Rotation um die Z-Achse gilt:

$$R_z(\Phi) = \begin{bmatrix} \cos(\Phi) & -\sin(\Phi) & 0 \\ \sin(\Phi) & \cos(\Phi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad 3.8$$

### 3.3.2 Referenzsensorik (Laser Tracker)

Um kamerabasierte Fahrerbeobachtungssysteme hinsichtlich ihrer Genauigkeit bewerten zu können, ist es sinnvoll, ein anderes Sensorprinzip zu verwenden, um systematische, prinzipbedingte Fehler einschätzen zu können. Für die Analysen in Kapitel 4 wurde deshalb ein Laser Tracker eingesetzt. Im Folgenden wird dieser kurz vorgestellt.

Der Laser Tracker LaserBIRD der Firma Ascension Technology Corporation (2007) besteht aus einer Haupteinheit und einem Sensor, der am zu vermessenden Objekt, in diesem Fall am Kopf des Fahrers, befestigt wird. Die von der Haupteinheit emittierten Laserstrahlen ( $\pm 50^\circ$  horizontal,  $\pm 52^\circ$  vertikal) werden von 3 Fotodioden am Sensor, je nach Position im Raum, nach unterschiedlichen Laufzeiten detektiert. Daraus werden die Lage des Sensors in allen 3 Dimensionen sowie die zugehörigen Rotationswinkel berechnet. Der Laser Tracker arbeitet intern mit einer Trackingfrequenz von 240Hz. Nach außen liefert er über eine serielle Schnittstelle konstant mit 100Hz gemittelte Messwerte aller 6 Freiheitsgrade des am Probandenkopf befestigten Sensors (2004). Die Genauigkeiten der Messwerte und der Arbeitsbereich des Sensors werden vom Hersteller wie in Tabelle 3.5 dargestellt, angegeben.

| Messgröße               | Arbeitsbereich  | Genauigkeit |
|-------------------------|-----------------|-------------|
| Translation             | 0,15 – 1,83m    | 0,7mm       |
| Rollwinkel              | $\pm 180^\circ$ | 0,5°        |
| Azimuth <sup>10</sup>   | $\pm 85^\circ$  | 0,5°        |
| Elevation <sup>11</sup> | $\pm 85^\circ$  | 0,5°        |

**Tabelle 3.5: Messgrößen und Genauigkeiten des LaserBIRD Sensors  
(Ascension Technology Corporation, 2004)**



**Abbildung 3.15: Referenzsensor – Lasertracker LaserBIRD bestehend aus einer Haupteinheit (oben) und einem Sensor mit 3 Photodioden (unten rechts),  
(Ascension Technology Corporation , 2007)**

---

<sup>10</sup> Horizontalwinkel

<sup>11</sup> Vertikal- bzw. Höhenwinkel

### 3.3.3 Versuchsfahrzeug

Für die Durchführung der Versuchsreihen (vgl. Kapitel 4, 5 und 7) war der Aufbau eines Versuchsfahrzeugs notwendig, der ebenfalls Teil der vorliegenden Arbeit war. Dafür wurde ein serienmäßiger Audi Q7 SUV<sup>12</sup> zu einem Driver Monitoring Versuchsträger umgerüstet. Die Umrüstung beinhaltete die Planung der Integration und Vernetzung der Messsysteme als auch die Modifikation vorhandener Seriensysteme (ACC und LDW) sowie die Organisation und Koordination des Umbaus. Lediglich der mechanische und elektrische Aufbau erfolgte bei einem spezialisierten Dienstleistungsunternehmen für Fahrzeugumbauten (BFFT, 2009). Die anschließende elektrische und softwareseitige Inbetriebnahme sowie eine fortlaufende Weiterentwicklung fand ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit statt und wurde maßgeblich vom Autor vorgenommen.

Das Fahrzeug wurde mit den zwei in Abschnitt 3.3.1.1 und 3.3.1.2 beschriebenen Kamerasystemen zur Fahrerbeobachtung ausgestattet. Außerdem wurde der Laser Tracker (vgl. Abschnitt 3.3.2) oberhalb der Beifahrertür am Dachhimmel integriert. Die Rechner für die Bildverarbeitung wurden im hinteren Teil des Fahrzeugs montiert. Im Handschuhfach wurde eine Dockingstation zur Befestigung eines Messlaptops verbaut. Dieser Laptop diente einerseits der Datenaufzeichnung und -auswertung, andererseits wurden auf ihm die prototypischen fahrerzustandsadaptiven Assistenzsystemalgorithmen implementiert. Das serienmäßig vorhandene ACC- und LDW-System wurde jeweils um ein Entwicklungsinterface ergänzt, sodass die prototypischen Algorithmen getestet werden konnten. Außerdem wurden im Fahrzeug alle CAN<sup>13</sup>-Busse (Komfort-, Antriebs- und Extended-CAN) mit einem Abgriff versehen. Dies ermöglichte das Aufzeichnen aller Fahrzeugparameter während der Versuchsfahrten.

Der Versuchsträgeraufbau und die Vernetzung der einzelnen Komponenten ist schematisch in der folgende Abbildung 3.16 dargestellt.

---

<sup>12</sup> engl. Sport Utility Vehicle

<sup>13</sup> engl. Controller Area Network – Standard Datenbus in der Fahrzeugvernetzung

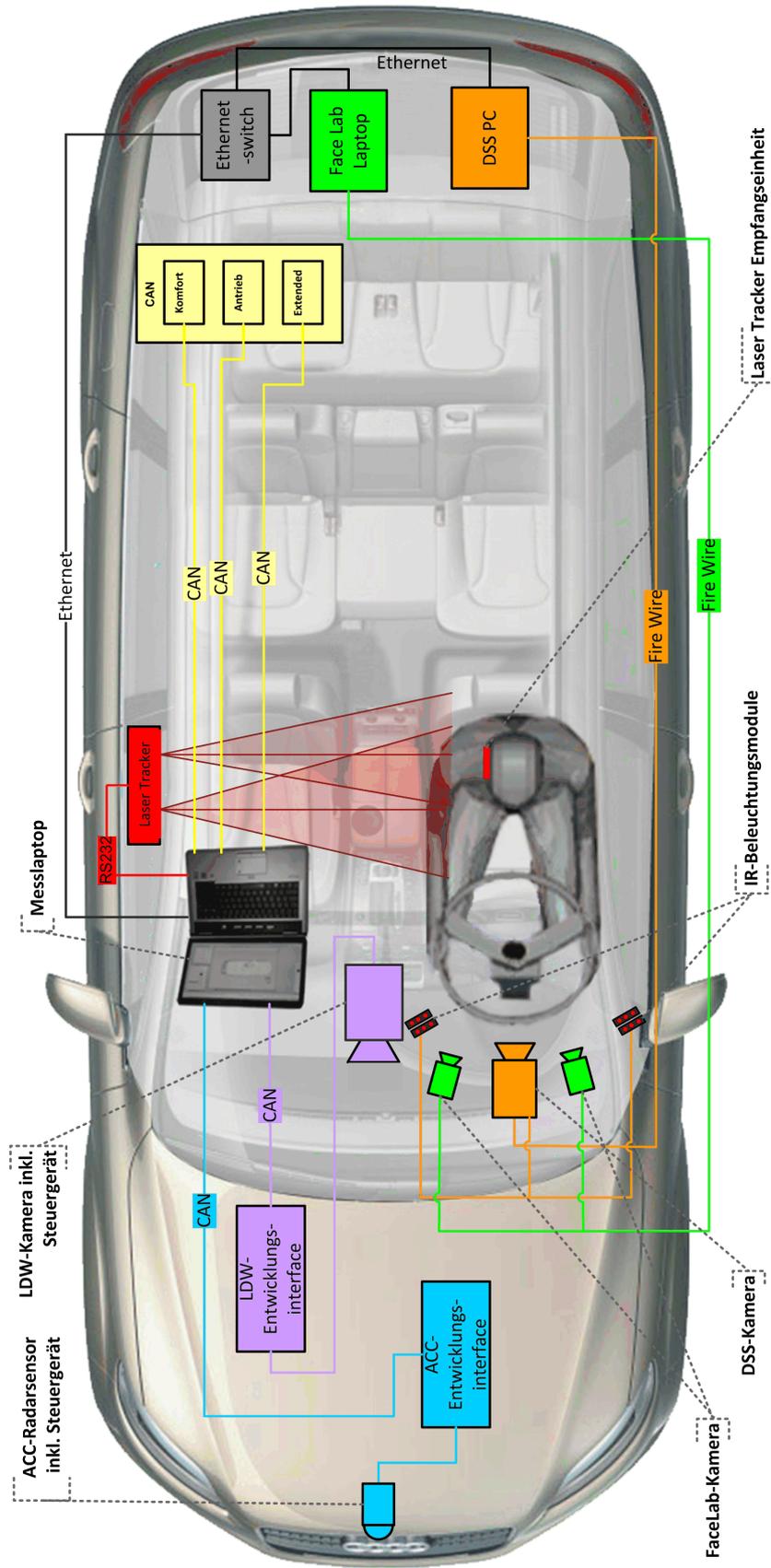


Abbildung 3.16: Aufbau Q7 Versuchsfahrzeug

## **4 Eine Methode zur Evaluierung**

### **kamerabasierter Fahrerbeobachtungssysteme**

In diesem Kapitel wird ein Konzept vorgestellt, anhand dessen sich videogestützte Fahrerbeobachtungssysteme hinsichtlich ihres Erfassungsbereiches sowie der Genauigkeit der gelieferten Messgrößen bewerten lassen. Dafür wurde ein Messverfahren basierend auf einem lasergestützten Referenzsensor entwickelt. Die Funktionsfähigkeit dieses Verfahrens wurde in einer Probandenstudie unter Beweis gestellt (Trefflich, 2008).

Gegenstand dieser Versuchsreihe war es zu bestimmen, in welchem Intervall Kopfpositionsverlagerungen und Kopfdrehungen des Fahrers während typischer Fahrsituationen wie Stadtverkehr, Überlandfahrt und Autobahnfahrt auftreten. Gleichzeitig sollte untersucht werden, wie exakt das monokulare Driver Monitoring System DSS diese Werte ermitteln kann, wie groß der Erfassungsbereich tatsächlich ist und welchen Einfluss die Gesichtsmimik auf die Messwerte hat. Außerdem wurden im Stand Messungen durchgeführt, die Aufschluss darüber geben sollen, auf welche Regionen im Fahrzeugcockpit eine Kopfwendung mit Hilfe des DSS Systems unter „Laborbedingungen“ erfasst werden kann.

#### **4.1 Messprinzip**

Grundlage des Messverfahrens ist eine echtzeitfähige Kopplung aus dem Laser BIRD Laser Tracker (vgl. Abschnitt 3.3.2) und einem kamerabasierten Fahrerbeobachtungssystem, in diesem Fall dem Driver State Sensor (vgl. Abschnitt 3.3.1.1). Beide Systeme werden derart verbunden, dass sowohl online während der Messfahrten, als auch später offline anhand aufgezeichneter Datensätze, ein direkter Vergleich aller 6 gemessenen Freiheitsgrade (vgl. Tabelle 3.3) der Kopfposition und Kopforientierung von beiden Sensorsystemen möglich ist.



Abbildung 4.1: Anordnung des DSS Systems, mittig vor dem Fahrer die Kamera (grün) sowie die 2 IR-Beleuchtungsmodule (rot) links und rechts

Der Laser Tracker wurde seitlich neben dem Probanden montiert und liefert Angaben über die Position und Orientierung seines Sensors, einer frei beweglichen Empfangseinheit, welche seitlich am Kopf des Probanden befestigt wurde. Die Kamera des Driver State Sensors wurde direkt mittig vor dem Fahrer auf dem Armaturenbrett montiert (vgl. Abbildung 4.1). Der schematische Aufbau des Versuchsfahrzeugs ist in Abbildung 3.16 dargestellt.

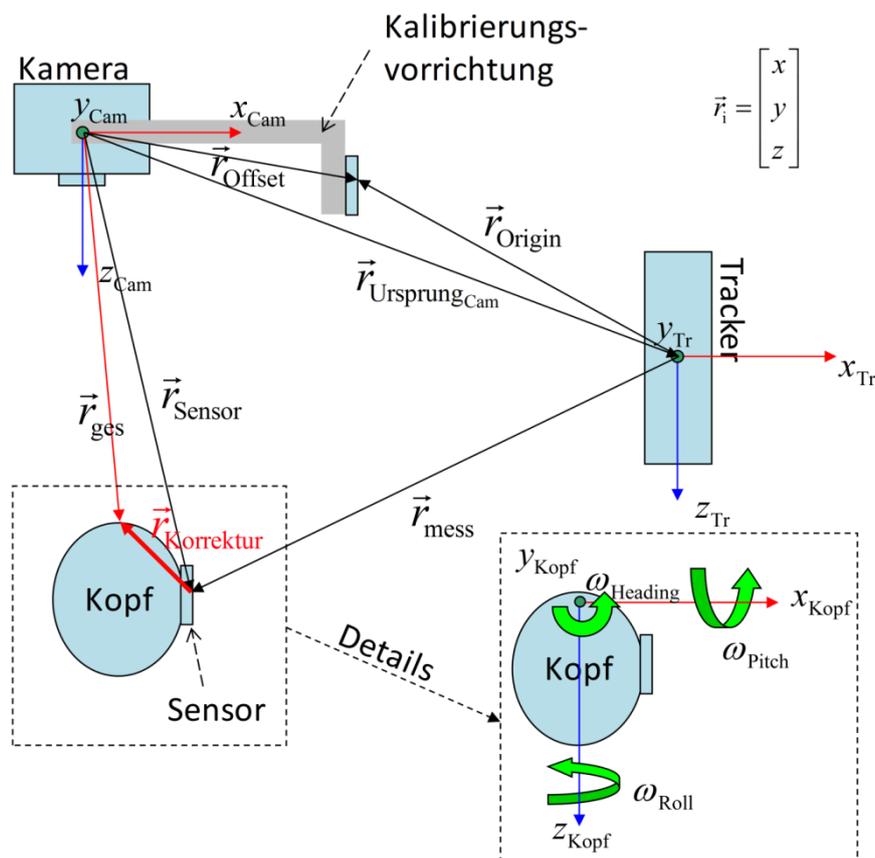


Abbildung 4.2: Lage der Koordinatensysteme – geometrische Beziehungen (Trefflich, 2008)

Die geometrischen Zusammenhänge zwischen beiden Messsystemen sind in Abbildung 4.2 dargestellt. Das Kamerasystem schätzt zur Laufzeit einen Positionsvektor  $\vec{r}_{ges}$  sowie eine Kopforientierung  $\vec{\omega}$ . Der Laser Tracker liefert Angaben über die Position  $\vec{r}_{mess}$  und die Orientierung  $\vec{\omega}_{sensor}$  seines Sensors.

### Kalibrierung

Der Laser Tracker bietet die Möglichkeit, das seinen Messungen zugrunde liegende Koordinatensystem frei im Raum zu positionieren. Mit Hilfe einer Kalibriervorrichtung wird zuerst die Lage der DSS Kamera bezüglich des Trackers hinsichtlich Position und Orientierung bestimmt und der Vektor  $\vec{r}_{Ursprung\&Cam}$  als Offset des Koordinatenursprungs definiert. Das Messsystem liefert fortan den Vektor  $\vec{r}_{Sensor}$  als aktuelle Position.

Aufgrund von Okklusion und Schattenwurf, die die Leistungsfähigkeit des Driver Monitoring Systems deutlich mindern können, wird auf die Verwendung einer festen Aufnahme für den Sensor des Laser Trackers, beispielsweise eines Helmes, verzichtet. Somit variiert die Montageposition der Empfangseinheit zwischen verschiedenen Probanden und bedarf einer Winkelkalibrierung.

Hierfür wird der Kopf des Probanden orthogonal zur Kamera mit Hilfe einer Kinnaufklage fixiert, sodass gilt:  $\vec{r}_{ges} = [0,0,z]$  und  $\vec{\omega} = [0,0,0]$ . Die zu diesem Zeitpunkt vorliegende Orientierung  $\vec{\omega}_{Sensor}$  bezeichnet die probandenspezifische Befestigung des Sensors am Kopf und wird als Winkeloffset des Trackers definiert.

### Transformation

Nach erfolgreich durchgeführter Kalibrierung kann bereits jetzt ein Vergleich der Kopforientierung in Kamerakoordinaten (KK) erfolgen. Es besteht jedoch noch keine Möglichkeit eines direkten Vergleiches von Laser Tracker und DSS Positionsangaben, da beide Systeme verschiedene Punkte am Kopf der jeweiligen Testperson tracken. Zum Verständnis der nachfolgenden Betrachtung wurde, wie bereits in Abschnitt 3.3.1.3 erläutert, die Lage des Weltkoordinatensystems (WK) im Kameraursprung definiert (vgl. Abbildung 3.13).

Für den benötigten Korrekturvektor  $\vec{r}_{Korrektur}$  (vgl. Abbildung 4.2) gilt:

$$\vec{r}_{Korrektur_{WK}} = \vec{r}_{ges_{KK}} - \vec{r}_{Sensor_{KK}} \quad \text{wenn } \vec{r}_{ges_{KK}} = [0,0,z] \text{ und } \vec{\omega}_{KK} = [0,0,0] \quad 4.1$$

## 4.1 Messprinzip

In allen anderen Fällen ist  $\vec{r}_{\text{Korrektur}_{\text{WK}}}$  eine Funktion von  $\vec{\omega}_{\text{KK}}$ . Hingegen ist der Vektor  $\vec{r}_{\text{Korrektur}_{\text{H}}}$  im Kopfkoordinatensystem stets konstant und lässt sich gemäß Abbildung 4.3 als Linearkombination der Basisvektoren beschreiben:

$$\vec{r}_{\text{Korrektur}_{\text{H}}} = r_x \vec{x}_H + r_y \vec{y}_H + r_z \vec{z}_H = [r_x, r_y, r_z] \text{ mit } \vec{x}_H, \vec{y}_H, \vec{z}_H = \vec{e}_i \quad 4.2$$

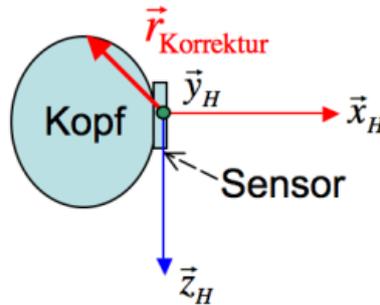


Abbildung 4.3: Lage des Kopfkoordinatensystems (Trefflich, 2008)

Unter der Bedingung  $\vec{r}_{\text{ges}} = [0, 0, z]$  und  $\vec{\omega} = [0, 0, 0]$  gilt somit:

$$\vec{r}_{\text{Korrektur}_{\text{H}}} = \vec{r}_{\text{Korrektur}_{\text{WK}}} = \vec{r}_{\text{ges}_{\text{KK}}} - \vec{r}_{\text{Sensor}_{\text{KK}}} \quad 4.3$$

Bei dem Vektor  $\vec{r}_{\text{ges}_{\text{KK}}}$  handelt es sich um den Positionsvektor des DSS Systems. Dieser darf jedoch zur Bestimmung des Korrekturvektors  $\vec{r}_{\text{Korrektur}_{\text{H}}}$  nicht herangezogen werden, da

- die Kalibrierung des Trackers ohne Schätzergebnisse des DSS Systems erfolgen muss und
- insbesondere die z-Koordinate, also der Tiefenschätzwert des DSS Systems unzureichend genau ist (vgl. Abschnitt 3.3.1.3).

Daher wird der benötigte z-Wert aus den Parametern des optischen Abbildungssystems und dem Positionsvektor  $\vec{r}_{\text{Sensor}}$  aus zwei verschiedenen Frames ( $t_i$ ) wie folgt bestimmt:

$$z_{\vec{r}_{\text{ges}}}^{(t_1)} = f - D_{\text{px}}^{(t_1)} \left( \frac{z_{\vec{r}_{\text{Sensor}}}^{(t_2)} - z_{\vec{r}_{\text{Sensor}}}^{(t_1)}}{D_{\text{px}}^{(t_2)} - D_{\text{px}}^{(t_1)}} \right) \quad 4.4$$

mit:  $f \triangleq$  Brennweite

$D_{\text{px}}^{(t_i)} \triangleq$  Augenabstand D bei  $t_i$  in Pixel

### Berechnungen zur Laufzeit

Anhand der Gesetzmäßigkeiten für affine Abbildungen wird der Vektor  $\vec{r}_{gesTracker}$  zur Laufzeit berechnet und kann direkt mit  $\vec{r}_{gesDSS}$  verglichen werden. Abbildung 4.3 verdeutlicht die folgenden mathematischen Zusammenhänge:

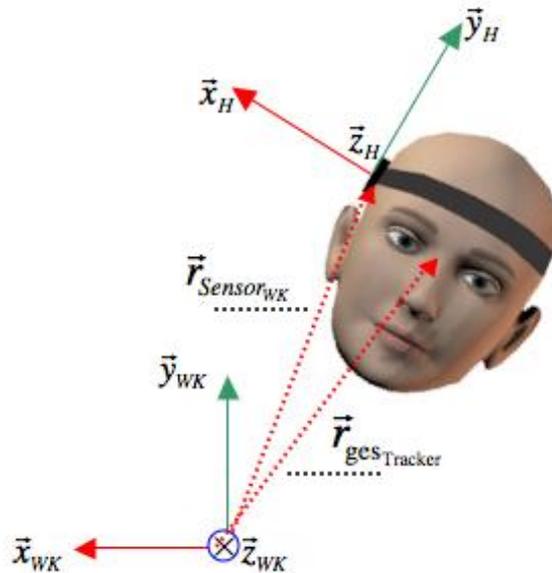


Abbildung 4.3: Messprinzip aus Sicht des Weltkoordinatensystems (Trefflich, 2008)

$$\vec{r}_{gesTracker} = R(\vec{\omega})\vec{r}_{Korrektur_H} + \vec{r}_{Sensor_{WK}} \quad 4.5$$

$$\text{mit: } R(\vec{\omega}) = \begin{bmatrix} \cos \Psi \cos \Phi & \cos \Psi \sin \Phi & -\sin \Psi \\ \sin \Theta \sin \Psi \cos \Phi - \cos \Theta \sin \Phi & \sin \Theta \sin \Psi \sin \Phi + \cos \Theta \cos \Phi & \sin \Phi \cos \Psi \\ \cos \Theta \sin \Psi \cos \Phi + \sin \Theta \sin \Phi & \cos \Theta \sin \Psi \sin \Phi - \sin \Theta \cos \Phi & \cos \Phi \cos \Psi \end{bmatrix}$$

dabei gilt:  $\Theta = \omega_{Pitch}$ ;  $\Psi = \omega_{Heading}$ ;  $\Phi = \omega_{Roll}$

$\vec{r}_{Korrektur_H}$  : vgl. Gleichung 4.2

$\vec{r}_{Sensor_{WK}}$  : aktueller Messwert des Laser Trackers

## 4.2 Versuchsaufbau und Durchführung

Um die Funktionstüchtigkeit des Evaluierungskonzeptes auch in der Praxis nachzuweisen und Aussagen über Genauigkeit und Erfassungsbereich des DSS Systems treffen zu können, wurde eine Probandenstudie durchgeführt. Es fanden dabei Fahrversuche mit 35 Probanden statt. Die Zusammensetzung und Altersstruktur der Probandengruppe ist Tabelle 4.1 bzw. Tabelle 4.2 zu entnehmen.

| Anzahl      | Männlich | Weiblich | Gesamt |
|-------------|----------|----------|--------|
| Ohne Brille | 17       | 5        | 22     |
| Mit Brille  | 13       | 0        | 13     |
| Gesamt      | 30       | 5        | 35     |

Tabelle 4.1: Zusammensetzung der Probandengruppe

|              | Alter |
|--------------|-------|
| Minimum      | 23    |
| Maximum      | 44    |
| Durchschnitt | 29    |

Tabelle 4.2: Altersstruktur der Probandengruppe

### Zuwendung des Gesichtsfeldes

Der erste Teil der Messungen fand im stehenden Fahrzeug statt. Ziel dabei war es herauszufinden, auf welche Regionen im Fahrzeugcockpit eine Zuwendung des Gesichtsfeldes (vgl. Abschnitt 2.6.1) mit Hilfe des DSS detektierbar ist. Der Proband wurde deshalb angewiesen, sich vollständig mit dem Kopf in Richtung der jeweiligen Region zu drehen und möglichst keine Blickbewegungen mit den Augen vorzunehmen. Folgende Regionen wurden dafür im Fahrzeugcockpit markiert und der Reihe nach angeblickt (vgl. Abbildung 4.4):

1. Linker Außenspiegel
2. Rechter Außenspiegel
3. Innenspiegel
4. Kombi-Instrument
5. MMI<sup>14</sup> - Display
6. Klimabedienteil

---

<sup>14</sup> MMI – Multi Media Interface

7. Windschutzscheibe Ecke oben rechts
8. Windschutzscheibe Ecke oben links

#### **Einfluss von Mimik**

Um den Einfluss der Gesichtsmimik auf die Messwerte des DSS Systems beurteilen zu können, wurde dem Fahrer anschließend, ebenfalls bei stehendem Fahrzeug, ein Text im zentralen Sichtfeld auf der Windschutzscheibe präsentiert und der Fahrer aufgefordert, diesen laut vorzulesen.

#### **Varianzen bei der Initialisierung**

Um zu bestimmen, welche Varianzen bei der Initialisierung d.h. beim Aufsetzen des Kopfmodells auftreten können, wurde das Tracking des DSS Systems mehrfach neu gestartet und der Proband dabei instruiert, seine Kopforientierung möglichst nicht zu verändern bzw. bei zwei weiteren Messungen eine leichte horizontale Kopfdrehung sowie eine Nickbewegung auszuführen.

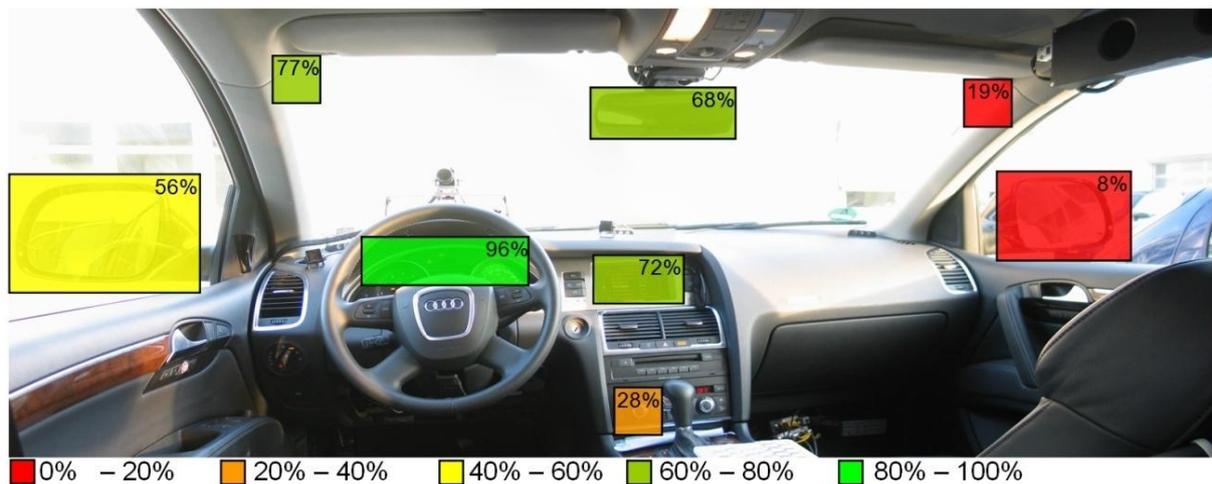
#### **Erfassungsbereich und Genauigkeit im Realverkehr**

Zur Ermittlung des tatsächlich mit dem DSS System erreichbaren Erfassungsbereiches im realen Straßenverkehr sowie zur Beurteilung der Genauigkeit der dabei gelieferten Messgrößen wurden Testfahrten durchgeführt. Dabei wurde zwischen den Streckenabschnitten Stadt, Land und Autobahn unterschieden. Die Gesamtlänge der Teststrecke betrug ca. 60km. Dabei entfielen jeweils ca. 16km auf den Stadtverkehr und die Landstraße, 27km wurden auf einer Bundesautobahn (A9) zurückgelegt. Den Probanden wurden für diesen Versuchsteil keine zusätzlichen Vorgaben gemacht, sie wurden lediglich aufgefordert möglichst „normal“ zu fahren.

## 4.3 Genauigkeit und Erfassungsbereich – Ergebnisse

### Zuwendung des Gesichtsfeldes

Auf welche Regionen im Versuchsfahrzeug eine Kopfdrehung noch zuverlässig mit dem verwendeten Driver State Sensor erfasst werden kann, zeigt Abbildung 4.4. Dabei gibt die Prozentzahl rechts oben in den farbigen Rechtecken an, welcher Anteil der ermittelten Messwerte den jeweiligen Regionen noch eindeutig zugeordnet werden konnte. Als eindeutig wurde in dem Zusammenhang definiert, dass eine deutliche Kopfdrehung des Probanden in Richtung der jeweiligen Region ununterbrochen durch den DSS verfolgt werden konnte und dabei eine Kopfsignalgüte von 60% nicht unterschritten wurde. Ein Abgleich der Messwerte zwischen Laser Referenzsensor und DSS fand bei diesem Versuchsteil hingegen nicht statt.



**Abbildung 4.4: Erfassbare Gesichtsfeldzuwendung bei stehendem Fahrzeug zu den jeweiligen Regionen im Fahrzeugcockpit (Trefflich, 2008)**

Bei der Betrachtung der Messwerte fällt auf, dass im zentralen Cockpitbereich um den Geradeausblick auf die Straße Gesichtsfeldzuwendungen auf die jeweiligen Regionen sehr gut detektierbar sind. So konnte eine Zuwendung auf das Kombiinstrument zu 96%, auf das MMI-Display zu 72% und auf den Innenspiegel zu 68% erkannt werden. Abwendungen in Regionen mit größerem Abstand vom Koordinatenursprung des Weltkoordinatensystems (vgl. Kapitel 3.3.1.2), wie z.B. auf das Klimabedienteil, konnten dagegen nur zu 28%, auf den rechten Außenspiegel nur zu 8% mit Hilfe des DSS Systems erfasst werden.

Diese ersten Ergebnisse zeigen, dass die Güte sowie die Messgenauigkeit des Gierwinkels  $\psi$  und des Nickwinkels  $\theta$  bei stärkeren Kopfdrehungen deutlich abnehmen. Es lässt sich vermuten, dass dabei ein direkter Zusammenhang zwischen der Messgenauigkeit und der Anzahl der für das Kamerasystem

sichtbaren Gesichtsmarkale (z.B. Augen, Nasenlöcher, Mundwinkel) besteht (vgl. in Kapitel 3.3.1.3 „Funktionsweise – Kamerasysteme“). Ist beispielsweise ein großer Teil der Gesichtsmarkale aufgrund einer Kopfdrehung in Richtung des rechten Außenspiegels verdeckt, wird vom DSS die Kopforientierung nur noch sehr unzuverlässig ausgegeben.

### Einfluss von Mimik

Um den durch Sprechen verursachten Einfluss von Mimikänderungen auf die Kopforientierungswinkel zu ermitteln, wurde in den Sequenzen des Textvorlesens der mittlere Abstand zwischen den durch das Kamerasystem bestimmten und den durch den Laser Tracker gemessenen Orientierungswinkeln berechnet. In der folgenden Tabelle 4.3 sind die Ergebnisse zusammengefasst. Die angegebenen Werte entsprechen dabei dem Mittelwert der Differenz zwischen den jeweiligen Kopforientierungswinkeln beider Messsysteme. Dabei fällt auf, dass primär der Gierwinkel ( $\psi$ ) und der Nickwinkel ( $\theta$ ) von sprachinduziertem Rauschen betroffen sind. Die dadurch entstehenden Messfehler bewegen sich bei beiden Parametern in der Größenordnung von  $6^\circ$ .

|                      | Breite des Rauschbandes |
|----------------------|-------------------------|
| $\Psi$ in $^\circ$   | 5,5                     |
| $\Theta$ in $^\circ$ | 6,1                     |
| $\Phi$ in $^\circ$   | 1,6                     |

Tabelle 4.3: Einfluss des durch Sprache verursachten Rauschens auf die Kopfrotationswinkel

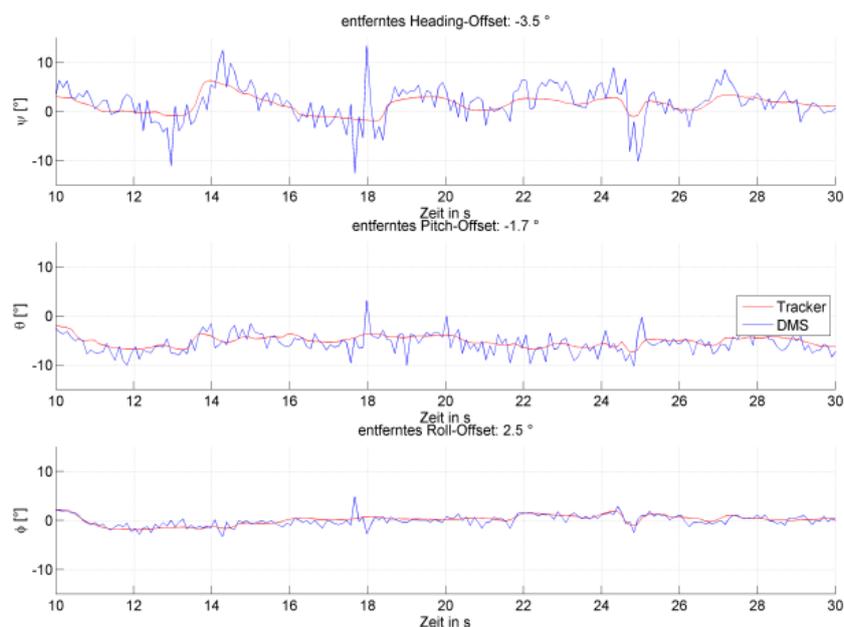
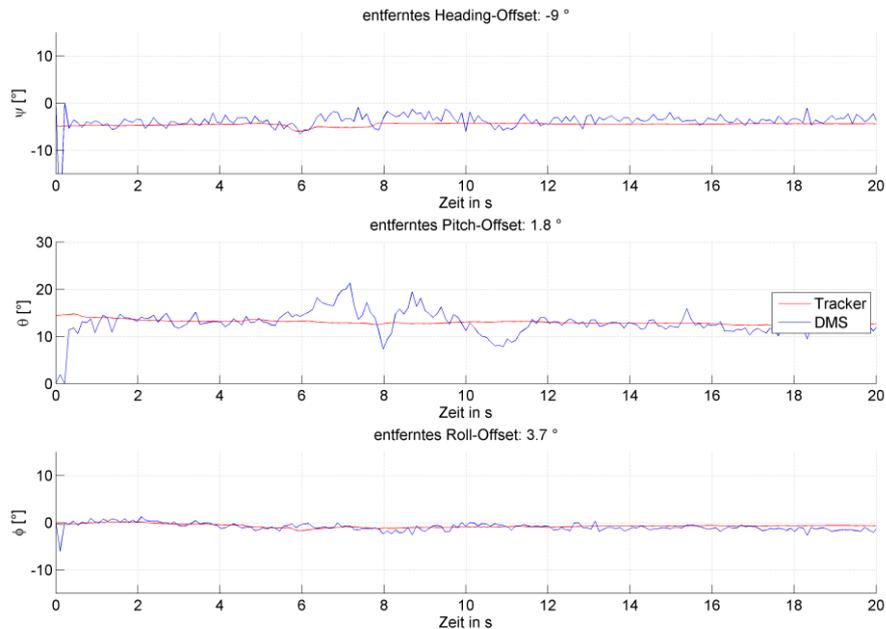


Abbildung 4.5: Signalverläufe der Kopforientierungswinkel MIT durch Sprechen induzierter Mimikänderung

#### 4.3 Genauigkeit und Erfassungsbereich – Ergebnisse

Ein Blick auf Abbildung 4.5 sowie auf die folgende Abbildung 4.6 verdeutlicht noch einmal die Zunahme des Signalrauschens in den Situationen des Textvorlesens.



**Abbildung 4.6: Signalverläufe der Kopforientierungswinkel OHNE durch Sprechen induzierterer Mimikänderung**

Aus diesen Ergebnissen kann der Schluss gezogen werden, dass eine Bewegung der Gesichtsmerkmale, z.B. hervorgerufen durch Sprechen, sich deutlich im Zeitverlauf der Kopforientierungswinkel widerspiegelt und damit großen Einfluss auf die Genauigkeit der Messungen hat.

#### **Varianzen bei der Initialisierung**

Um eventuell auftretende Varianzen in der automatischen Initialisierung und Anpassung des generischen Kopfmodelles auf verschiedene Person ermitteln zu können (vgl. Kapitel 3.3.1.3), wurde das DSS System mehrfach neu gestartet und der davor sitzende Proband instruiert, in einem ersten Durchgang seinen Kopf während des Neustarts nicht zu bewegen. In einem zweiten und dritten Versuchsdurchgang hingegen veränderten die Versuchspersonen den Nickwinkel, respektive den Gierwinkel ihres Kopfes während der Initialisierungsvorgänge. Dabei wurden die zwischen den unterschiedlichen Initialisierungen aufgetretenen Differenzen in allen 6 Freiheitsgraden relativ zu den zugehörigen Parametern des Laser Trackers bestimmt. Die ermittelten mittleren Fehler in den Positions- und Rotationsdaten sind in der folgenden Tabelle 4.4 zusammengefasst.

|                      | Keine Rotation | Nickbewegung ( $\Theta$ ) | Gierbewegung ( $\Psi$ ) |
|----------------------|----------------|---------------------------|-------------------------|
| X in cm              | 0,28           | 0,29                      | 0,76                    |
| Y in cm              | 0,69           | 0,95                      | 1,01                    |
| Z in cm              | 2,35           | 2,74                      | 3,45                    |
| $\Psi$ in $^\circ$   | 3,06           | 3,78                      | 4,48                    |
| $\Theta$ in $^\circ$ | 3,99           | 5,00                      | 5,59                    |
| $\Phi$ in $^\circ$   | 1,51           | 1,83                      | 2,15                    |

Tabelle 4.4: Durchschnittliche Höhe der Sprünge bei Neuaufsetzen des Kopfmodells

Der Mittelwert des Fehlers der X- und Y-Koordinate der gemessenen Kopfposition liegt im Bereich von 1cm. Die Tiefeninformation (Z-Koordinate) weist hingegen einen größeren mittleren Fehler im Bereich von 2,4cm bis 3,5cm auf. Die durchschnittliche Ungenauigkeit in der Gier- und Nickwinkelberechnung liegt im Intervall von 3 - 6°. Der für eine Aufmerksamkeitsfokusschätzung weniger bedeutende Rollwinkel scheint am stabilsten bestimmt werden zu können. Das zugehörige Fehlerintervall lässt sich mit 1,5 - 2,2° abschätzen (vgl. Tabelle 4.4).

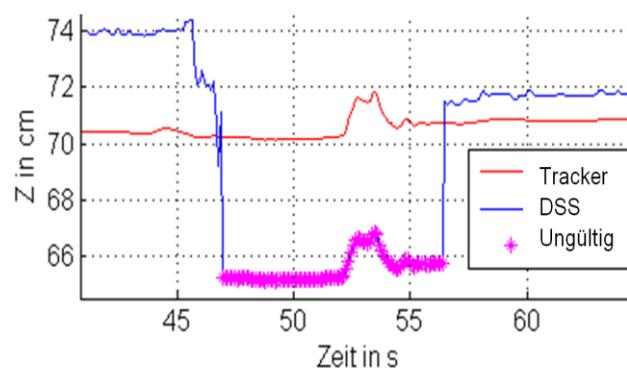


Abbildung 4.7: Fehler beim Aufsetzen des Kopfmodells (Trefflich, 2008)

In Abbildung 4.7 ist noch einmal der zeitliche Verlauf der Tiefeninformation (Z-Koordinate) vor und nach einer Neuinitialisierung des DSS Systems (blau Kurve) im Vergleich zum Laser Tracker (rote Kurve) dargestellt. Der magenta farbige Abschnitt innerhalb des Kurvenverlaufs des DSS markiert das Zeitintervall, in dem eine Reinitialisierung stattgefunden hat und deshalb keine gültigen Messwerte vorlagen. Am Verlauf der roten Kurve ist ersichtlich, dass der Proband während des Systemneustarts seinen Kopf vernachlässigbar gering in Z-Richtung bewegt hat. Dennoch weist das DSS System eine Lageveränderung in Z-Richtung zwischen beiden Initialisierungen von ca. 2,2cm aus.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Tiefeninformation (Z-Koordinate) des DSS Systems den größten Fehler aufweist. Die Ursache dafür liegt im monokularen Aufbau des DSS Systems begründet (vgl. Kapitel 3.3.1.1 und 3.3.1.3).

**Erfassungsbereich und Genauigkeit im Realverkehr**

Die während der durchgeführten Testfahrten vom Driver State Sensor als auch vom Laser Tracker ermittelten Kopffpositions- und Kopffrotationsintervalle sind in Tabelle 4.5 zusammengefasst. Dabei ist auffällig, dass Kopffpositionsveränderungen auf allen 3 Straßentypen nur in einem relativ kleinen Bereich stattfinden. Der Ursprung des Kopffpositionsvektors (die Nasenwurzel) befindet sich im Mittel in einem Quader der Dimension 12x10x17cm (vgl. Abbildung 4.8). Im Vergleich dazu sind in der Kopffrotation, vor allem im Gierwinkel  $\psi$ , erhebliche Unterschiede in Abhängigkeit vom jeweiligen Straßentyp festzustellen. Während im Stadtverkehr die größte Veränderungen im Gierwinkel auftrat, ist das Rotationsintervall während Autobahnfahrten um ca. 30° kleiner (vgl. Tabelle 4.5 und Abbildung 4.9).

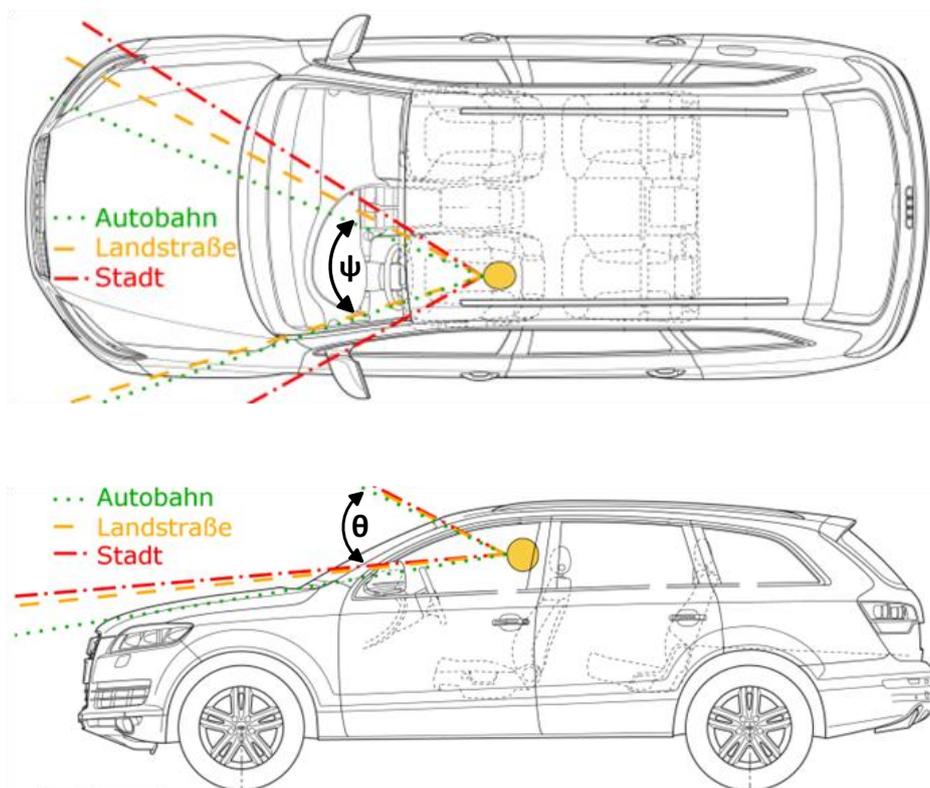


**Abbildung 4.8: Verteilung der typischen Kopffposition (Trefflich, 2008)**

| <i>Autobahn</i>      |              | Min   | Max  | <i>Landstraße</i>    |              | Min   | Max  | <i>Stadt</i>         |              | Min   | Max  |
|----------------------|--------------|-------|------|----------------------|--------------|-------|------|----------------------|--------------|-------|------|
| <b>Laser Tracker</b> | x [cm]       | -1,7  | 8,3  | <b>Laser Tracker</b> | x [cm]       | -2,2  | 9,1  | <b>Laser Tracker</b> | x [cm]       | -3,9  | 9,5  |
|                      | y [cm]       | 8,4   | 19,0 |                      | y [cm]       | 7,8   | 18,0 |                      | y [cm]       | 8,5   | 18,4 |
|                      | z [cm]       | 51,5  | 69,5 |                      | z [cm]       | 51,1  | 68,3 |                      | z [cm]       | 51,2  | 68,3 |
|                      | $\psi$ [°]   | -22,7 | 18,6 |                      | $\psi$ [°]   | -28,0 | 17,2 |                      | $\psi$ [°]   | -32,7 | 29,0 |
|                      | $\theta$ [°] | -9,5  | 25,3 |                      | $\theta$ [°] | -6,1  | 26,7 |                      | $\theta$ [°] | -5,0  | 27,9 |
|                      | $\phi$ [°]   | -8,4  | 8,9  |                      | $\phi$ [°]   | -10,1 | 9,5  |                      | $\phi$ [°]   | -9,9  | 9,7  |
| <i>Autobahn</i>      |              | Min   | Max  | <i>Landstraße</i>    |              | Min   | Max  | <i>Stadt</i>         |              | Min   | Max  |
| <b>DSS</b>           | x [cm]       | -1,6  | 8,4  | <b>DSS</b>           | x [cm]       | -2,3  | 8,6  | <b>DSS</b>           | x [cm]       | -2,4  | 8,7  |
|                      | y [cm]       | 10,1  | 19,0 |                      | y [cm]       | 9,4   | 18,2 |                      | y [cm]       | 9,0   | 18,6 |
|                      | z [cm]       | 51,3  | 71,9 |                      | z [cm]       | 50,9  | 70,1 |                      | z [cm]       | 50,2  | 74,3 |
|                      | $\psi$ [°]   | -22,3 | 17,9 |                      | $\psi$ [°]   | -27,1 | 17,0 |                      | $\psi$ [°]   | -28,9 | 20,8 |
|                      | $\theta$ [°] | -9,5  | 28,1 |                      | $\theta$ [°] | -10,6 | 29,4 |                      | $\theta$ [°] | -9,9  | 32,4 |
|                      | $\phi$ [°]   | -8,1  | 8,7  |                      | $\phi$ [°]   | -9,0  | 9,7  |                      | $\phi$ [°]   | -10,1 | 12,0 |

**Tabelle 4.5: Gegenüberstellung der von Laser Tracker und DSS System ermittelten mittleren Kopffpositions- und Kopffrotationsintervallgrenzen, die in den 3 genannten Streckenabschnitten aufgetreten sind**

Die in Tabelle 4.5 angegebenen Zahlenwerte spiegeln jeweils die obere und die untere Intervallgrenze des vermessenen Freiheitsgrades im entsprechenden Streckenabschnitt wieder. Dafür wurden der sicher erfasste Maximal- und Minimalwert der während der Testfahrten aufgetretenen Kopfpositionen bzw. Kopfrotationen bestimmt und über alle Probanden gemittelt. Die Grenzwerte von Laser Tracker und Driver State Sensor wurden dabei unabhängig voneinander ermittelt und korrelieren somit nicht direkt. Als zuverlässig erreichter Erfassungsbereich wurde dabei das Intervall angenommen, in welchem 95% der Datenpunkte liegen, unter der Voraussetzung, dass 2,5% der aufgenommenen Werte kleiner und 2,5% größer sind. Außerdem wurde eine Mindestkopfsignalgüte des DSS Systems von 60% vorausgesetzt.



**Abbildung 4.9: Benötigter Erfassungsbereich der Kopfrotation im jeweiligen Streckenabschnitt, ermittelt mit dem Laser Referenzsystem (Trefflich, 2008)**

In Abbildung 4.9 sind die vom Referenzsensor ermittelten Rotationsintervallgrenzen für alle 3 Streckenabschnitte grafisch dargestellt. Betrachtet man die Intervallgrenzen beider Systeme, insbesondere die des Winkels  $\psi$  im Stadtverkehr, kann geschlussfolgert werden, dass große Kopfdrehungen, z.B. durch Blicke in den rechten Außenspiegel, vom Kamerasystem nicht mehr erfasst werden können. Dies korreliert auch mit den Ergebnissen der im Stand durchgeführten Messungen hinsichtlich der Blickregionenerkennung (vgl. Abbildung 4.4).

### 4.3 Genauigkeit und Erfassungsbereich – Ergebnisse

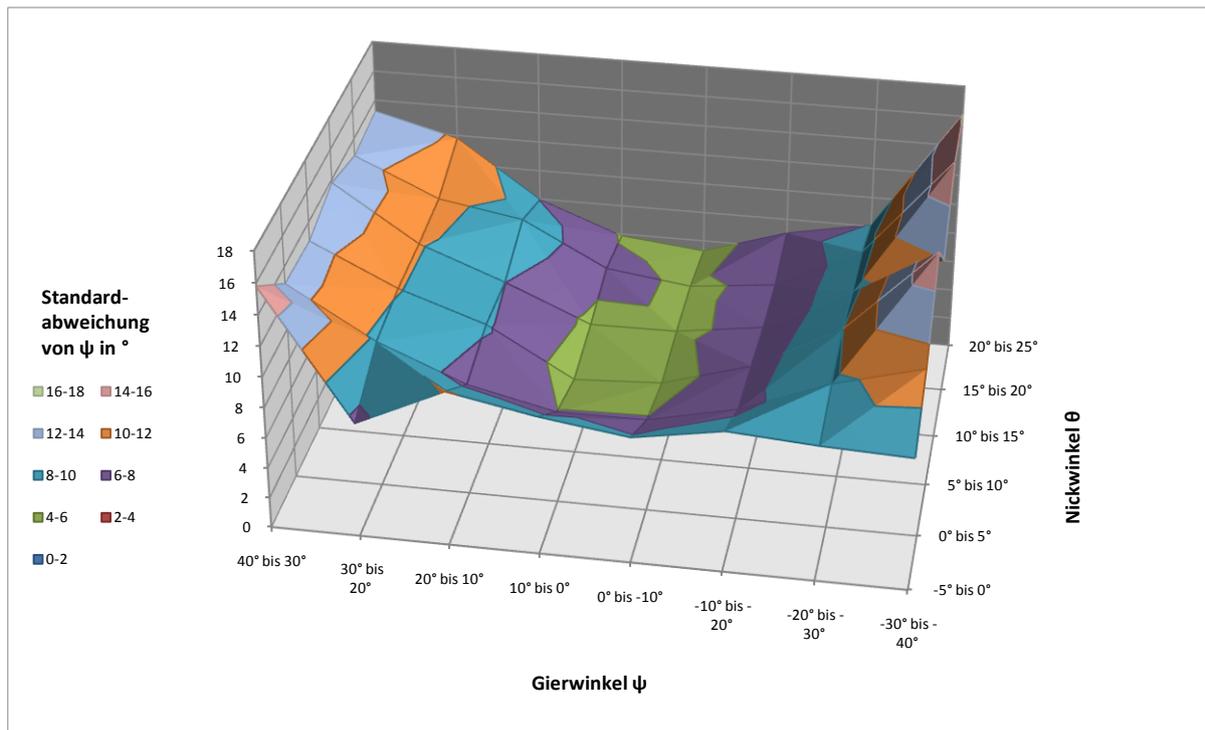
Neben der maximal erfassbaren Kopfdrehung um die X- und Y-Achse ist das Auflösungsvermögen innerhalb des Bereiches, in welchem die Kopfverfolgung möglich ist, von entscheidender Bedeutung. Unter Auflösungsvermögen wird in diesem Zusammenhang der Betrag der Kopfpositions- bzw. der Kopffrotationsänderungen, welcher gerade noch zuverlässig vom Tracking System erfasst werden kann, verstanden.

| $\theta \backslash \psi$ | 30° bis 40°    |               | 20° bis 30° |               | 10° bis 20° |               | 0° bis 10° |               | -10° bis 0° |               | -20° bis -10° |               | -30° bis -20° |               | -40° bis -30° |               |
|--------------------------|----------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|------------|---------------|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|                          | MW<br>[°]      | StdAbw<br>[°] | MW<br>[°]   | StdAbw<br>[°] | MW<br>[°]   | StdAbw<br>[°] | MW<br>[°]  | StdAbw<br>[°] | MW<br>[°]   | StdAbw<br>[°] | MW<br>[°]     | StdAbw<br>[°] | MW<br>[°]     | StdAbw<br>[°] | MW<br>[°]     | StdAbw<br>[°] |
| 20° bis 25°              | $\psi$ 0,73    | 13,24         | -0,92       | 11,79         | -0,73       | 7,95          | -0,69      | 5,85          | 0,14        | 5,27          | 0,53          | 7,03          | 1,15          | 8,07          | -4,48         | 16,1          |
|                          | $\theta$ -3,73 | 9,92          | -4,64       | 7,08          | -1,65       | 6,33          | -0,3       | 6,56          | 0,14        | 6,72          | 2,1           | 11,78         | -2,86         | 6,13          | -9,85         | 11,69         |
| 15° bis 20°              | $\psi$ 1       | 12,85         | 1,38        | 10,35         | -0,41       | 9,4           | -0,56      | 6,49          | -0,24       | 5,74          | -0,51         | 6,34          | -0,5          | 9,12          | -2,71         | 15,66         |
|                          | $\theta$ -2,41 | 5,59          | -2,54       | 6,86          | 0,45        | 6,77          | 0,72       | 6,9           | 0,22        | 5,47          | 0             | 6,54          | -2,4          | 6,88          | -7,69         | 9,03          |
| 10° bis 15°              | $\psi$ 0,2     | 13,79         | 1,59        | 10,14         | 0,78        | 8,02          | 0,04       | 5,63          | 0,09        | 5,68          | -0,01         | 6,46          | -1,13         | 9,4           | 1,03          | 12,02         |
|                          | $\theta$ -1,27 | 6,61          | -1,8        | 7,21          | -0,32       | 6,43          | 0,28       | 6,02          | -0,1        | 5,99          | -0,4          | 7             | -2,74         | 6,15          | -5,07         | 7,57          |
| 5° bis 10°               | $\psi$ -1,26   | 12,77         | 1,29        | 10,1          | 0,99        | 8,2           | 0,28       | 5             | -0,05       | 5,31          | 0,38          | 6,96          | -0,31         | 9,96          | 2,15          | 15,5          |
|                          | $\theta$ 1,57  | 6,36          | -0,88       | 7,51          | -0,57       | 6,66          | 0,18       | 5,58          | 0,08        | 5,7           | -0,6          | 6,49          | -2,16         | 7,48          | -2,93         | 8,25          |
| 0° bis 5°                | $\psi$ -4,49   | 12,93         | -1,3        | 9,65          | 1,03        | 7,34          | 0,12       | 6,06          | -0,09       | 6,09          | -0,19         | 7,34          | 0,78          | 9,56          | -1,02         | 11,07         |
|                          | $\theta$ 4,03  | 8             | 1,7         | 7,11          | 1,01        | 5,91          | 0,16       | 5,97          | -0,03       | 7,83          | 0,2           | 7,1           | -1,44         | 7,06          | -3,11         | 8,33          |
| -5° bis 0°               | $\psi$ -4,22   | 15,77         | 0,13        | 7,54          | 1,81        | 10,15         | -0,16      | 9,07          | -0,05       | 8,29          | -0,91         | 9,25          | 0,91          | 8,87          | 2,23          | 8,65          |
|                          | $\theta$ 3,35  | 8,64          | 3,55        | 6,17          | 1,28        | 6,96          | 0,81       | 8,79          | -0,89       | 7,4           | -0,24         | 6,94          | 0,1           | 7,12          | 0,03          | 8,61          |

**Tabelle 4.6: Mittlere Differenz und Standardabweichung der Kopffrotationswinkel zwischen Laser Tracker und DSS**

In Tabelle 4.6 ist über den gesamten Trackingbereich die über alle Probanden gemittelte Differenz der Kopffrotationswinkel  $\psi$  und  $\theta$  zwischen Laser Tracker und DSS System bzw. deren Standardabweichung aufgetragen. Daraus ist noch einmal ersichtlich (vgl. Messreihe bzgl. „Zuwendung des Gesichtsfeldes“), dass die ermittelten Messwerte des DSS Systems mit zunehmendem Winkel ungenauer werden. Der Mittelwert der Differenz sowie die Streuung steigen stark an (vgl. Abbildung 4.10).

Der Bereich mit der besten Übereinstimmung zwischen beiden Systemen erstreckt sich von -10° bis +10° Kopfdrehung um  $\psi$  und von 0° bis 25° Drehung um  $\theta$  (grün hinterlegter Bereich in Tabelle 4.6 und Abbildung 4.10). Die gemittelte Standardabweichung liegt in diesem Intervall in der Größenordnung von 5 - 6°.



**Abbildung 4.10: Standardabweichung des Nickwinkels zwischen Laser Tracker und Driver State Sensor, aufgetragen über den gesamten Erfassungsbereich von Gier- ( $\psi$ ) und Nickwinkel ( $\theta$ )**

## 4.4 Fazit

Zusammenfassend ist festzustellen, dass sich das vorgestellte Verfahren zur Bewertung von videobasierten Fahrerbeobachtungssystemen hinsichtlich Genauigkeit und Erfassungsbereich eignet. Der zuverlässig erreichte Trackingbereich des DSS Systems ist allerdings nicht ausreichend, um den kompletten Kopfbewegungsbereich, vor allem im realen Stadtverkehr, vollständig zu erfassen. Für Landstraßen- und Autobahnfahrten erscheint der Erfassungsbereich des Monokamerasystems aber durchaus als ausreichend, sofern man nicht den Anspruch hat, insbesondere im äußeren Blickfeld, noch hoch genaue Orientierungsangaben des Fahrerkopfes zu erhalten. Im zentralen Blickbereich des Fahrers kann von einem mittleren Fehler beider Rotationswinkel, beispielsweise hervorgerufen durch gesprächsbedingte Mimikänderungen (vgl. Tabelle 4.3) oder Varianzen bei der Initialisierung (vgl. Tabelle 4.4), von ca.  $6^{\circ}$  ausgegangen werden. Dies entspricht bei einem mittleren Abstand von ca. 61cm zur Kamera (vgl. Tabelle 4.5) einem Distanzfehler von rund 6cm.

Auf Grundlage der hier präsentierten Ergebnisse erscheint es sinnvoll, bei Verwendung des Driver State Sensors zur videobasierten Erfassung der Fahrerkopforientierung und -position, einen Ansatz hinsichtlich einer Aufmerksamkeitserkennung zu verfolgen, der möglichst robust gegenüber den zutage getretenen Systemgrenzen ist (vgl. Kapitel 6). Diese Feststellung lässt sich für alle monokamerabasierten Fahrerbeobachtungssysteme verallgemeinern, sofern diesen Systemen ein ähnliches Funktionsprinzip (vgl. Kapitel 3.3.1.3) zugrunde liegt.

# 5 Kopforientierung und Blickverhalten in typischen Fahrsituationen

Inhalt dieses Kapitels ist es, Aussagen darüber zu treffen, wie in normalen Verkehrssituationen bei einem typischen Fahrer Blickrichtung und Kopforientierung korrelieren. Im Weiteren wird darauf eingegangen, welche Kopforientierungen des Fahrers bei normaler aufmerksamer Fahrweise auftreten. Die Aufgabe des normalen aufmerksamen Fahrens wird dabei im Folgenden als Baseline Fahrt bezeichnet. Anschließend wird diskutiert, ob sich durch die Messungen belegen lässt, dass alleine anhand der Kopforientierung auf die visuelle Ablenkung des Fahrers geschlossen werden kann.

Um die genannten Aspekte untersuchen zu können, wurde in Zusammenarbeit mit dem Institut für Arbeitswissenschaften an der Universität der Bundeswehr eine Versuchsreihe im realen Straßenverkehr durchgeführt. Deren Aufbau und Ergebnisse werden anschließend vorgestellt und diskutiert.

## 5.1 Ziele der Studie

Die Ziele, die bei der Durchführung der Versuchsreihe im Blickpunkt standen, lassen sich in drei Kategorien zusammenfassen:

### **Kopforientierung unter Aufmerksamkeit**

Zum Ersten sollte untersucht werden, wie sich die Kopforientierung eines Fahrers bei aufmerksamer Fahrweise verhält. D.h. wie wird der Kopf bei normaler aufmerksamer Fahrweise bewegt? Dabei wurde betrachtet, ob es zu Unterschieden in Abhängigkeit von der Person sowie deren persönlichen Eigenschaften, wie z.B. Alter oder einer eventuell benötigten Brille, kam. Weiter wurde versucht herauszufinden, ob der Straßentyp einen nachweisbaren Einfluss auf das Kopforientierungsverhalten des Fahrers hat.

### **Korrelation von Blickrichtung und Kopforientierung**

Zum Zweiten sollte analysiert werden, wie stark sich die Kopf- und die Augenorientierung der verschiedenen Testpersonen bei Baseline Fahrten unterscheiden. Weiter wurde in diesem Zusammenhang untersucht, ob dabei Unterschiede im Kopforientierungsverhalten der Fahrer in Abhängigkeit vom Straßentyp auftraten und inwiefern es zu interindividuellen Differenzen kam.

### **Kopforientierung als Maß für Ablenkung**

Drittens wurde betrachtet, ob anhand der Kopforientierung auf die visuelle Ablenkung des Fahrers geschlossen werden kann (vgl. dazu auch Kapitel 2.7.1.1 sowie die Veröffentlichungen von Summala et al. (1998) und Zhang et al. (2008)). Um darüber Aussagen zu ermöglichen, wurden die Fahrer neben der Erledigung der primären Fahraufgabe zusätzlich durch Nebenaufgaben abgelenkt. Ablenkung in Form einer tertiären Fahraufgabe (vgl. Tabelle 2.1) wurde zum einen dadurch generiert, dass die Probanden gebeten wurden bestimmte Eingaben, wie ein Wechsel des Radiosenders oder die Anwahl eines Navigationszieles, im MMI zu tätigen. Zum anderen sollten während der Fahrten im Stadtverkehr die Straßennamen von den entsprechenden Verkehrsschildern laut vorgelesen werden. Eine detailliertere Beschreibung des Aufbaus und der Durchführung der Fahrstudie kann dem folgenden Teilkapitel entnommen werden.

## **5.2 Versuchsaufbau und Durchführung**

Die Probandengruppe, die im Rahmen der Studie zum Einsatz kam, bestand aus 28 Versuchspersonen, wobei die jüngste 24 und die älteste 59 Jahre alt war. Die Versuchsstrecke befand sich im Großraum München und wies eine Länge von 71km auf. Das Streckenprofil setzte sich aus Stadtautobahn- (Mittlerer Ring), Stadtverkehr-, Landstraßen- und Autobahnabschnitten zusammen. Die Länge der jeweiligen Abschnitte ist der folgenden Tabelle (vgl. Tabelle 5.1) zu entnehmen:

| <b>Streckentyp</b> | <b>Distanz in km</b> | <b>Anteil an der Gesamtstrecke in %</b> |
|--------------------|----------------------|---|
| Mittlerer Ring     | 5,5                  | 7,8                                     |
| Stadt              | 16                   | 22,5                                    |
| Landstraße         | 31                   | 43,7                                    |
| Autobahn           | 18,5                 | 26                                      |

**Tabelle 5.1: Streckenprofil**

Der Aufbau des bei den Fahrversuchen zum Einsatz gekommenen Fahrzeuges sowie der Messsysteme ist Abbildung 3.16 zu entnehmen und ist darüberhinaus in Kapitel 3.3 ausführlich beschrieben. Die Blickrichtungsdaten der Probanden wurden unter Verwendung des Face Lab Stereokamerasystems (vgl. Abschnitt 3.3.1.2) aufgezeichnet. Kopftrackingdaten wurden mit beiden Kamerasystemen, dem Face Lab System sowie dem Driver State Sensor (vgl. Abschnitt 3.3.1.1), parallel und zeitsynchron ermittelt. Zusätzlich wurden alle relevanten Fahrzeugparameter durch ein Mitschneiden des CAN-Bus-Datenverkehrs simultan aufgenommen sowie ein nachträgliches Bewerten der jeweiligen Verkehrssituation aus der Fahrerperspektive durch ein Aufzeichnen des LDW-Kamerabildes (vgl. Abschnitt 3.1.2) sichergestellt.

Die Probanden wurden instruiert, „normal“ zu fahren, so als wären sie mit ihrem privaten PKW unterwegs. Hauptaugenmerk bei der Gestaltung der Versuchsreihe war es, möglichst repräsentatives Datenmaterial von normalen aufmerksamen Fahrern zu erhalten.

## 5.3 Datenaufbereitung und Ergebnisse

Die während der Probandenfahrten aufgezeichneten Daten wurden im Vorfeld der Auswertung wie folgt aufbereitet: Aus der Gesamtheit aller Daten wurde ein erster Datenpool mit Fahrten ohne zusätzliche Ablenkung durch Nebenaufgaben (Baseline Fahrten) erzeugt. Dafür wurden Situationen wie Abbiegen, Überholen und Spurwechsel sowie die „Schilderaufgabe“ als auch die MMI-Bedienung herausgefiltert (vgl. Abbildung 5.1). Die zu den beiden letztgenannten Situationen dazugehörigen Sequenzen wurden in einem separaten Datenpool mit Fahrdaten, die unter visueller Ablenkung des Fahrers aufgezeichnet wurden, zusammengefasst.

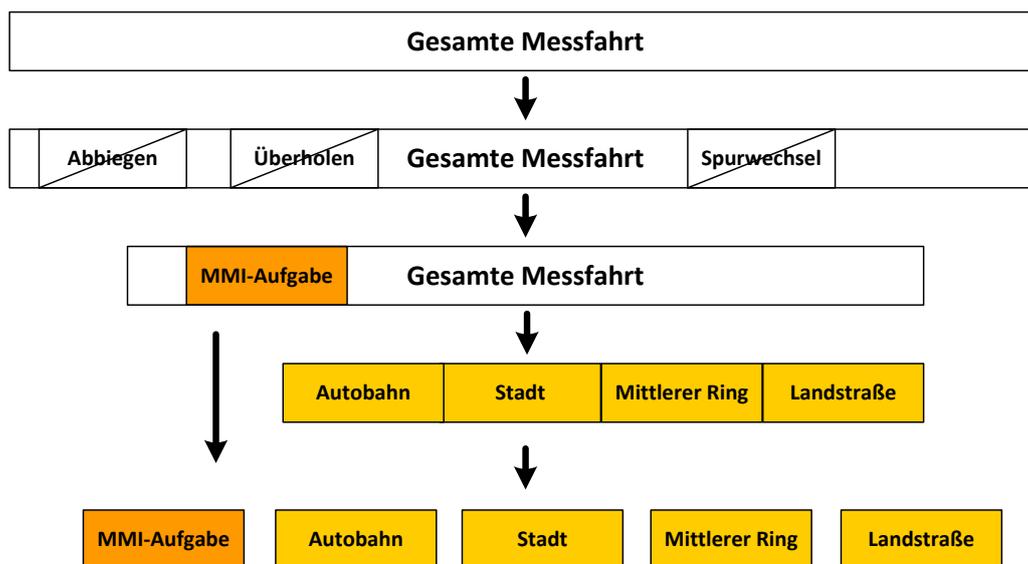


Abbildung 5.1: Zusammensetzung der Baseline Fahrten nach der Datenaufbereitung

In Ergänzung zu den in Kapitel 3.3.1.3 eingeführten Koordinatensystemen (vgl. auch Abbildung 3.13 und Abbildung 3.14) werden im Zuge der hier vorgestellten Versuchsreihe die Messergebnisse für die Kopforientierung und die Blickrichtung nicht in Form von Winkeldifferenzen angegeben. Vielmehr erfolgt die Beurteilung sowie Diskussion auf der Grundlage der jeweiligen Blickrichtungs- und Kopforientierungsdurchstoßpunkte in der Aufmerksamkeitsebene bei  $z = 0$ . Die Abstände der beiden Durchstoßpunkte werden jeweils für die beiden relevanten Koordinaten  $x$  und  $y$  getrennt ausgewiesen. Der geometrische Zusammenhang ist in der sich anschließenden Abbildung 5.2 dargestellt.

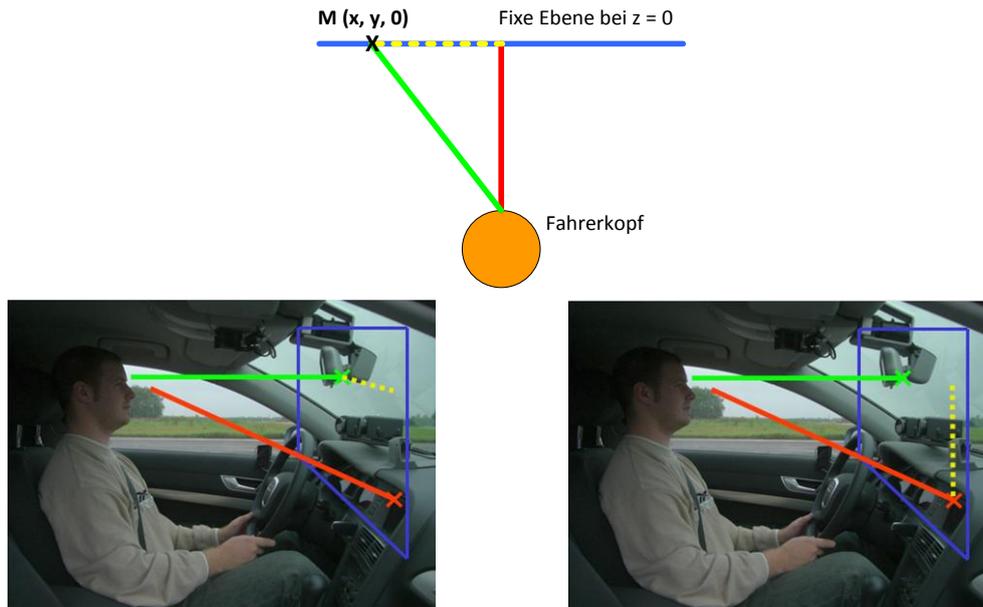


Abbildung 5.2: Bestimmung der Blickrichtungs- (rot) und Kopforientierungsdurchstoßpunkte (grün) sowie deren Abstände in x und y (gelb)

### 5.3.1 Kopforientierung unter Aufmerksamkeit

#### Abhängigkeit vom Streckentyp

Betrachtet man die Häufigkeitsverteilungen über alle Probanden der Kopforientierungsdurchstoßpunkte in der folgenden Abbildung 5.3 so fällt auf, dass es in x keine signifikant feststellbaren Unterschiede hinsichtlich des Ortes der Ausrichtung der Kopforientierung im Hinblick auf den Streckentyp gibt.

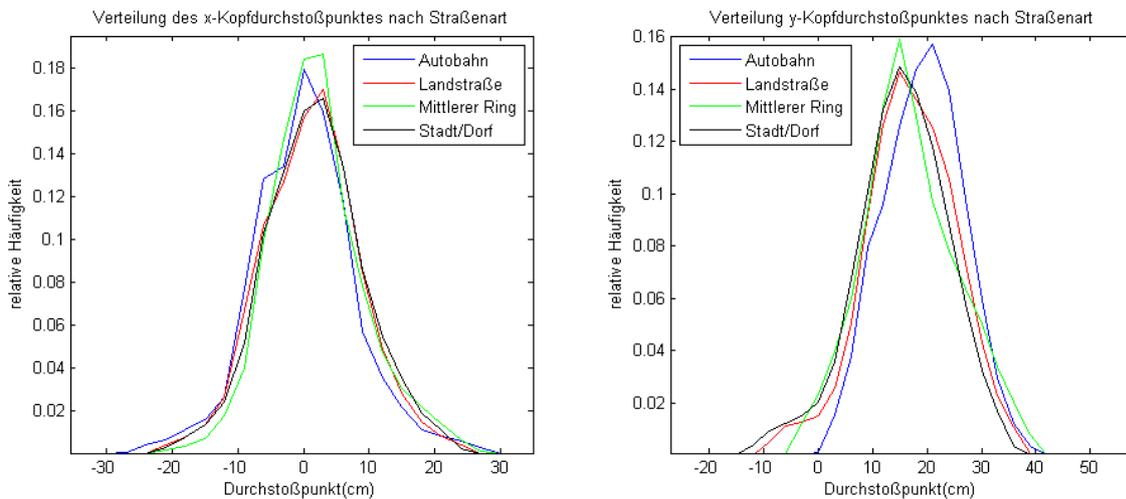


Abbildung 5.3: Kopforientierung bei aufmerksamer Fahrweise in Abhängigkeit vom Streckentyp in x (links im Bild) und y (rechts im Bild)

In der Verteilung der y-Koordinaten der Durchstoßpunkte sind kleinere Differenzen der Grafik in Abbildung 5.3 zu entnehmen. Diese erwiesen sich allerdings bei genauerer Analyse als nicht signifikant.

Im Durchschnitt befand sich der Schnittpunkt mit der Aufmerksamkeitsebene bei dieser Versuchsreihe, gemittelt über alle Probanden sowie alle Streckentypen, im Bereich von 0,17 - 2,04cm in x und 15,27 – 19,26cm in y.

Die dem entsprechenden Perzentile, also die Bereiche unterhalb derer sich 95% respektive 5% der ermittelten Messwerte befinden, sind Tabelle 5.2 zu entnehmen.

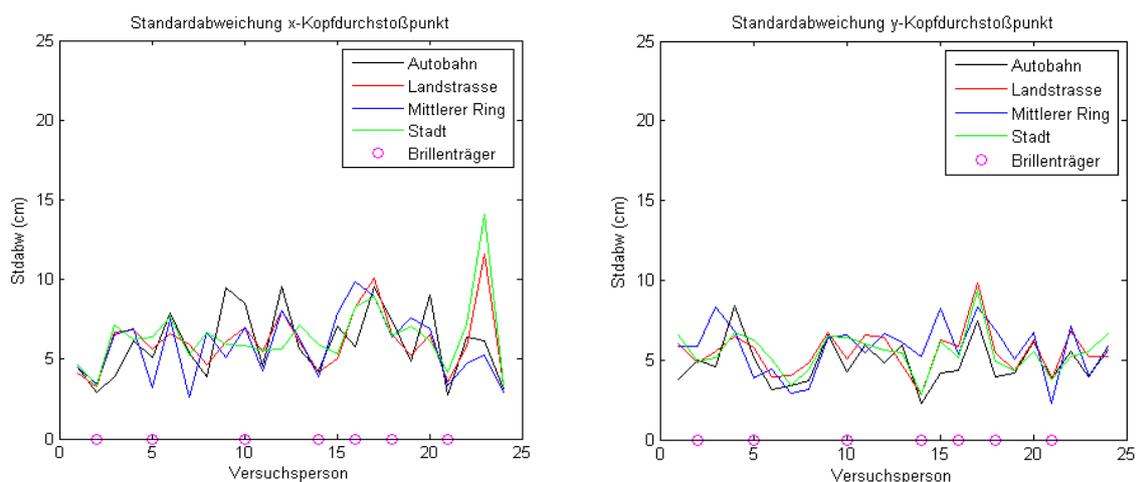
|                           | <b>x</b>         | <b>y</b>        |
|---------------------------|------------------|-----------------|
| <b>Standardabweichung</b> | 0,17 bis 2,04    | 15,27 bis 19,26 |
| <b>5%-Perzentil</b>       | -11,78 bis -8,68 | 0,14 bis 7,28   |
| <b>95%-Perzentil</b>      | 13,42 bis 15,66  | 28,66 bis 32,36 |

**Tabelle 5.2: Verteilung der Kopforientierungsdurchstoßpunkte**

Aus diesen Ergebnissen kann geschlussfolgert werden, dass der Einfluss des Straßentyps auf das Kopforientierungsverhalten vernachlässigbar gering ist.

#### Interindividuelle Unterschiede

Im nächsten Schritt wurden die erhobenen Messdaten auf interindividuelle Varianzen zwischen den Versuchspersonen in den jeweiligen Streckenabschnitten hin untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.4 dargestellt.



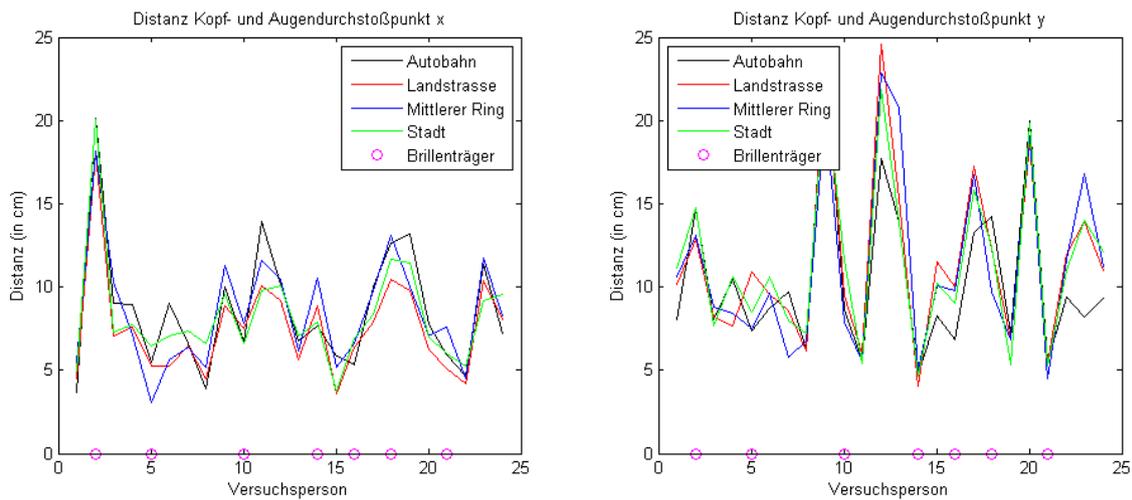
**Abbildung 5.4: Interindividuelle Unterschiede in der Kopforientierung bei aufmerksamer Fahrweise auf unterschiedlichen Streckentypen in x (links im Bild) und y (rechts im Bild)**

Das Intervall zwischen der Versuchsperson mit dem größten und der mit dem kleinsten x-Wert des Durchstoßpunktes beträgt 6,19cm. Analog ergibt sich für die y-Koordinate ein Schwankungsbereich von 5,45cm.

Bei detaillierterer Betrachtung lässt sich feststellen, dass im Rahmen der Studie keine signifikanten interindividuellen Unterschiede für die Durchstoßpunkte der Kopforientierungsgeraden hinsichtlich Alter, Fahrerfahrung oder einer eventuell getragenen Brille nachweisbar waren.

**Korrelation von Blickrichtung und Kopforientierung**

Ein weiterer zentraler Aspekt bei der Durchführung der Fahrversuche war herauszufinden, inwieweit Blickrichtung und Kopforientierung auf unterschiedlichen Straßenarten und bei verschiedenen Testpersonen miteinander korrelieren. Die im Hinblick auf diese Fragestellungen erhaltenen Ergebnisse sind den Kurvenverläufen in Abbildung 5.5 zu entnehmen sowie, noch einmal in Zahlenwerten ausgedrückt, in Tabelle 5.3 zusammengefasst.



**Abbildung 5.5: Abstand der Durchstoßpunkte von Blickrichtung und Kopforientierung in x (links im Bild) und y (rechts im Bild)**

| Streckenabschnitt | MW x-Abstand in cm | StdAbw x-Abstand in cm | MW y-Abstand in cm | StdAbw y-Abstand in cm |
|-------------------|--------------------|------------------------|--------------------|------------------------|
| Autobahn          | 8,58               | 6,43                   | 10,42              | 7,18                   |
| Landstraße        | 7,54               | 5,82                   | 11,51              | 7,04                   |
| Mittlerer Ring    | 8,46               | 5,96                   | 11,24              | 6,28                   |
| Stadtverkehr      | 9,58               | 6,13                   | 11,39              | 6,93                   |
| Gesamtstrecke     | 8,20               | 6,08                   | 11,14              | 6,86                   |

**Tabelle 5.3: Mittelwert sowie Standardabweichung des Abstandes zwischen Durchstoßpunkt der Blickrichtung und Kopforientierung**

Der Mittelwert des Abstandes zwischen Blickrichtungs- und Kopforientierungsdurchstoßpunkt in der  $z=0$ -Ebene betrug für die x-Koordinate 8,20cm und für die y-Koordinate 11,14cm, gemittelt über alle Probanden sowie alle Streckenabschnitte. Es kann festgestellt werden, dass die Verteilungen des Abstandes zwischen Blickrichtung und Kopforientierung erhebliche interindividuelle Unterschiede aufweisen, aber sich diese Differenzen nicht durch persönliche Eigenschaften wie Alter, Fahrerfahrung oder das Tragen einer Brille erklären lassen. Betrachtet man darüberhinaus die räumliche Verteilung des Abstandes zwischen Blickrichtung und Kopforientierung (vgl. Abbildung 5.6 und Abbildung 5.7), fällt auf, dass mit größerer Differenz vom zentralen Blick geradeaus auch der Betrag des Abstandes zwischen den beiden Durchstoßpunkten erheblich zunimmt.

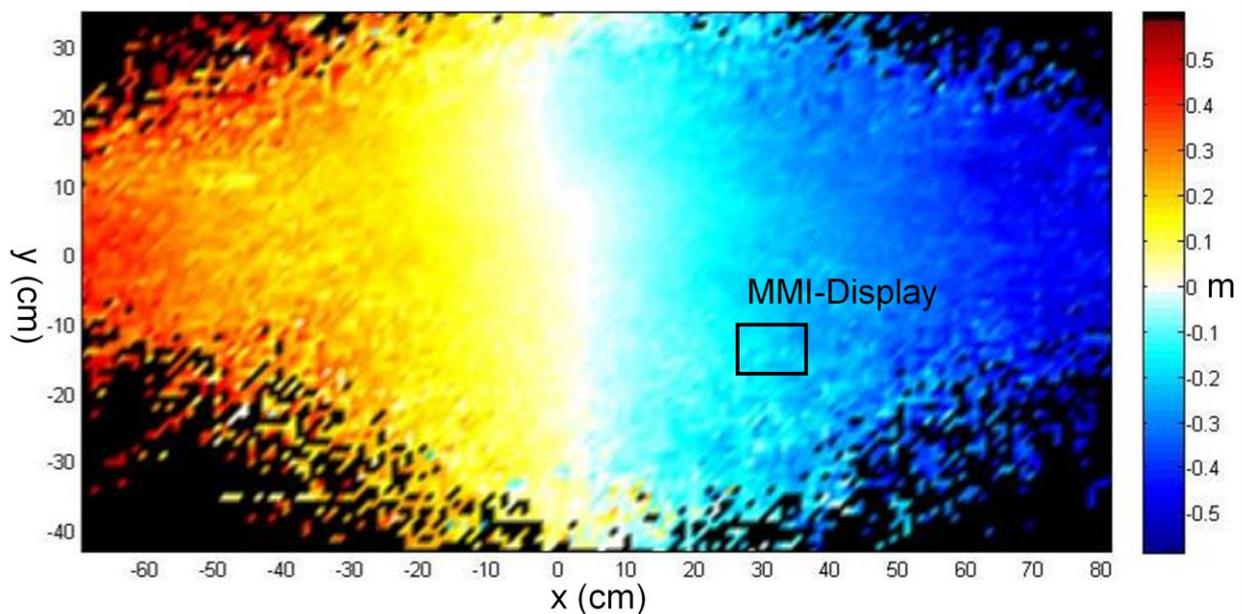


Abbildung 5.6: Distanz in  $x = x_{\text{Auge}} - x_{\text{Kopf}}$  aufgetragen über den gesamten Erfassungsbereich

Bei einem Blick auf den MMI Bildschirm im Q7-Cockpit kommt es dabei beispielsweise bereits im Mittel zu einer Differenz von typischerweise ca. 20 - 30cm in negativer x-Richtung zwischen Kopforientierung und Blickrichtung. In der betragsmäßig gleichen Größenordnung bewegen sich auch die jeweiligen Abstände in der y-Koordinate (vgl. Abbildung 5.7). Der mittlere absolute Abstand zwischen Blick- und Kopfrichtung betrug, gemittelt über alle Fahrten und alle Fahrer der Versuchsreihe, 22,33cm in x- und 15,21cm in y-Richtung.

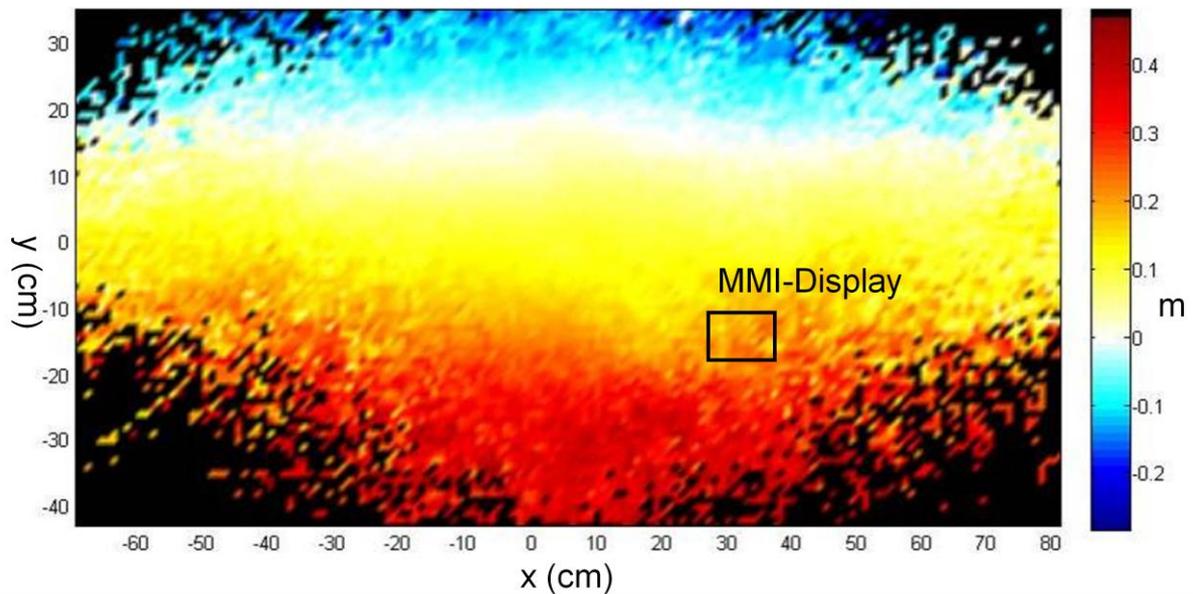


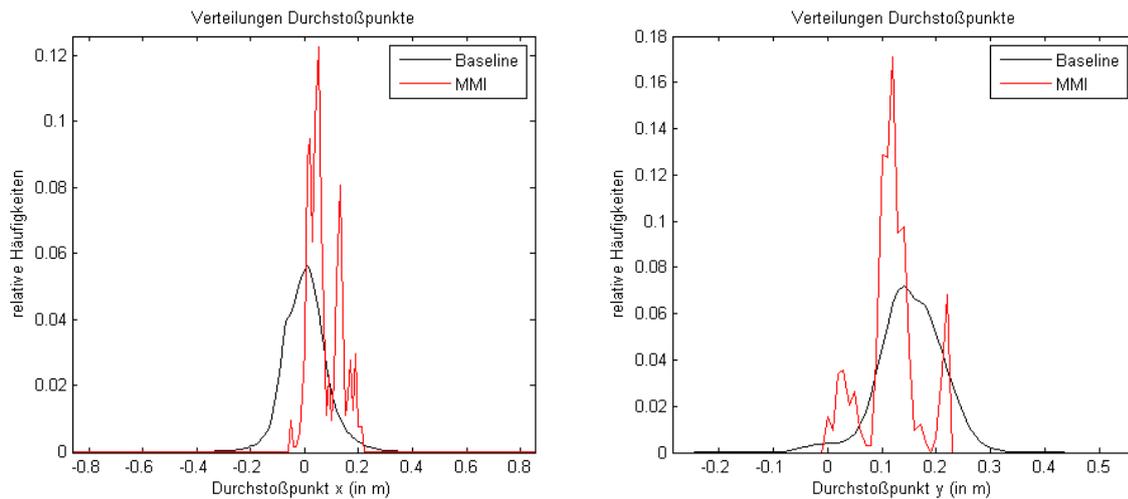
Abbildung 5.7: Distanz in  $y = y_{\text{Auge}} - y_{\text{Kopf}}$  aufgetragen über den gesamten Erfassungsbereich

### 5.3.2 Kopforientierung als Maß für Ablenkung

Eine weitere zentrale Fragestellung bei der Durchführung der Probandenstudie war, ob anhand der Kopfpose auf die visuelle Ablenkung des Fahrers geschlossen werden kann. Wie bereits in Abschnitt 2.7.1.1 ausgeführt, weisen verschiedene Studien, beispielsweise Summala (1998) und Zhang (2008), darauf hin, dass eine starke Korrelation zwischen visueller Ablenkung und der Blickabwendung sowie, etwas geringer, zwischen visueller Ablenkung und der Abwendung der Kopforientierung besteht (vgl. Abbildung 2.6). Diese Aussagen werden im Zuge der folgenden Messdatenauswertung und –interpretation noch einmal hinterfragt. Weiterhin erfolgt eine Betrachtung unter Verwendung des DSS Systems (vgl. Abschnitt 3.3.1.1) und unter Berücksichtigung dessen systemspezifischer Grenzen hinsichtlich Genauigkeit und Trackingbereich (vgl. Kapitel 4.3).

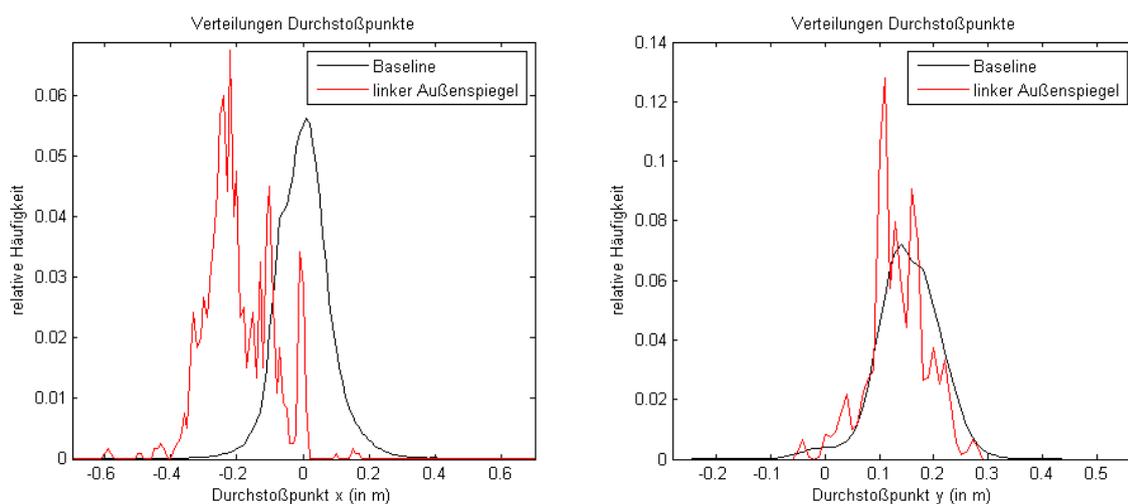
#### 5.3.2.1 Regionenbasierte Klassifikation

Betrachtet man die relativen Häufigkeitsverteilungen der Durchstoßpunkte der Kopforientierung während einer Baseline Fahrt (ohne gezielte Ablenkung) und während der gezielten visuellen Ablenkung durch eine Bedienung des Multi Media Interfaces (MMI) gemittelt über alle Probanden (vgl. Tabelle 5.4), ist augenfällig, dass sich nur auf der Grundlage des Ortes der Kopfposenausrichtung keine Aussage über visuelle Ablenkung treffen lässt. Die Häufigkeitsverteilungen beider Situationen überlappen sich deutlich für beide Koordinatenachsen (vgl. Abbildung 5.8).



**Abbildung 5.8: Kopforientierung in x (links im Bild) und y (rechts im Bild) bei der Bedienung des Multi Media Interfaces (MMI-Aufgabe) vs. Baseline Fahrt,**

Ein ähnliches Bild zeigt sich ebenfalls beim Vergleich der relativen Kopforientierungshäufigkeitsverteilungen für die Baseline Fahrten und der Situation „Blick in den linken Außenspiegel“. Die Kurvenverläufe für die y-Koordinate überlappen sich nahezu vollständig für diese beiden Konstellationen. Die relative Häufigkeitsverteilung der x-Koordinate weist allerdings bei Spiegelblicken in den linken Außenspiegel einen deutlich weiter links vom zentralen Geradeausblick liegenden Schwerpunkt auf. Dennoch ist auf dessen Grundlage keine Unterscheidung zwischen einem typischerweise aufmerksamen Blick auf den vorausfahrenden Verkehr und einer Zuwendung der visuellen Aufmerksamkeit auf den Bereich des linken Rückspiegels möglich, da es sich bei den Darstellungen lediglich um Graphen der relativen Häufigkeitsverteilungen handelt.

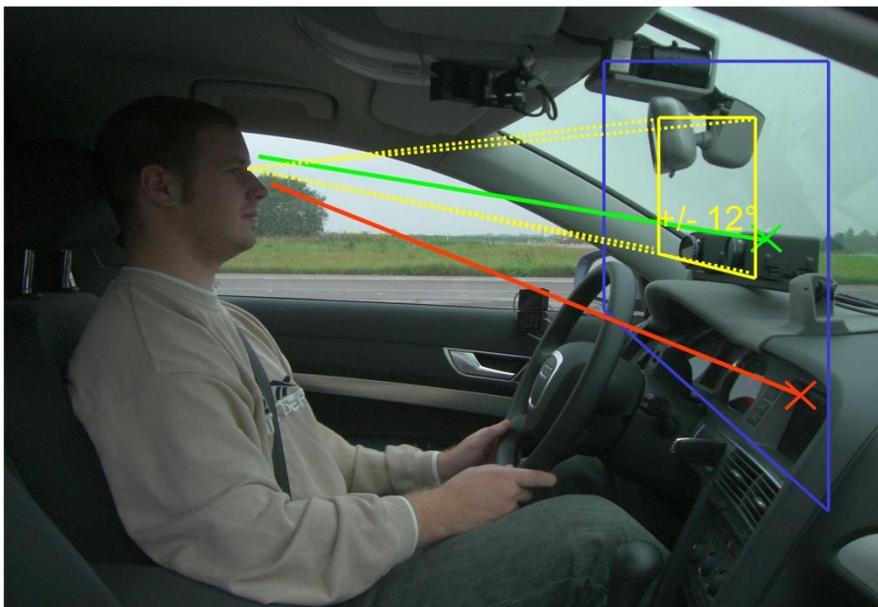


**Abbildung 5.9: Kopforientierung in x (links im Bild) und y (rechts im Bild) bei Spiegelblick links vs. Baseline Fahrt**

Es kann somit festgestellt werden, dass eine reine statische räumliche Betrachtung, basierend auf einer Regionenklassifikation, für eine Erkennung des Zustandes typischer visueller Ablenkung nicht ausreichend ist. Diese Ergebnisse decken sich mit den in Zhang (2004) getroffenen und im Abschnitt 2.7.1.1 diskutierten Aussagen.

### 5.3.2.2 Berücksichtigung der Abwendungsdauer

Wie bereits in Abschnitt 2.7.1.1 diskutiert und zu Beginn von Kapitel 6 dieser Arbeit noch einmal detaillierter betrachtet, lässt sich durch ein Erkennen der Abwendung des Gesichtsfeldes von einer Aufmerksamkeitsregion unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Abwendungsdauer visuelle Ablenkung treffender klassifizieren, als durch den in Absatz 5.3.2.1 verwendeten rein regionenbasierten Ansatz. Als Aufmerksamkeitsregion kann dabei laut Zhang (2004) ein Bereich von  $\pm 12^\circ$  in beiden Raumwinkeln  $\psi$  und  $\theta$  (vgl. Abbildung 3.13 zu Lage der Koordinatensysteme) um den Blick geradeaus auf den vorausfahrenden Verkehr angenommen werden (vgl. Abbildung 5.10). Die Zeitdauer, ab der eine Gesichtsfeldabwendung als kritisch zu werten ist, wurde hierfür in Abschnitt 2.7.1.1 mit 1,5s festgelegt (Theofanou (2002) und NHTSA (2006)). Eine Auswertung der im Rahmen der Versuchsreihe erhobenen Daten unter diesen beiden Gesichtspunkten liefert die in Tabelle 5.4 zusammengefassten Ergebnisse.



**Abbildung 5.10: Definition einer Aufmerksamkeitsregion von jeweils  $\pm 12^\circ$  in  $\psi$  und  $\theta$  um den zentralen Blick geradeaus in Anlehnung an Zhang (2004)**

|                    | Anzahl der Klassifikationen „visuell abgelenkt“ | Prozentualer Anteil an der Gesamtstrecke | Kumulierte Dauer in Stunden | Gewichte Anzahl Klassifikationen pro Minute |
|--------------------|---|--|-----------------------------|---|
| Stadtverkehr       | 44  | 9,42%                                    | 3,28                        | 0,22  |
| Landstraße         | 105   | 22,48%                                   | 8,3                         | 0,21  |
| Mittlerer Ring     | 12  | 2,57%                                    | 1,15                        | 0,17  |
| Autobahn           | 31  | 6,64%                                    | 1,73                        | 0,30  |
| Abbiegemanöver     | 44  | 9,42%                                    | 1,45                        | 0,51  |
| „MMI-Aufgabe“      | 3   | 0,64%                                    | 0,28                        | 0,18  |
| „Schilder-Aufgabe“ | 150   | 32,12%                                   | 5,02                        | 0,50  |
| Spurwechsel        | 41  | 8,78%                                    | 0,86                        | 0,80  |
| Überholmanöver     | 37  | 7,92%                                    | 0,86                        | 0,72  |
| <b>Summe</b>       | <b>467</b>                                      | <b>100%</b>                              | <b>22,92</b>                |   |

Tabelle 5.4: Anzahl und Verteilung der Klassifikationen "visuell abgelenkt" anhand der +/-12°

## Aufmerksamkeitsregion

Den Ergebnissen in Tabelle 5.4 ist zu entnehmen, dass unter Anwendung des beschriebenen Ansatzes zur Klassifikation von visueller Ablenkung, rund 41% der Unaufmerksamkeitsklassifikationen während Baseline Fahrten, also während Situationen normal aufmerksamen Fahrens, aufgetreten sind (grau hinterlegte Zeilen in Tabelle 5.4). Setzt man diese 192 „Fehlklassifikationen“ mit der Gesamtfahrdauer der Baseline Fahrten ins Verhältnis, so ergibt sich ein Wert von durchschnittlich 0,23 falschen Unaufmerksamkeitsklassifikationen pro Minute während aufmerksamen Fahrens.

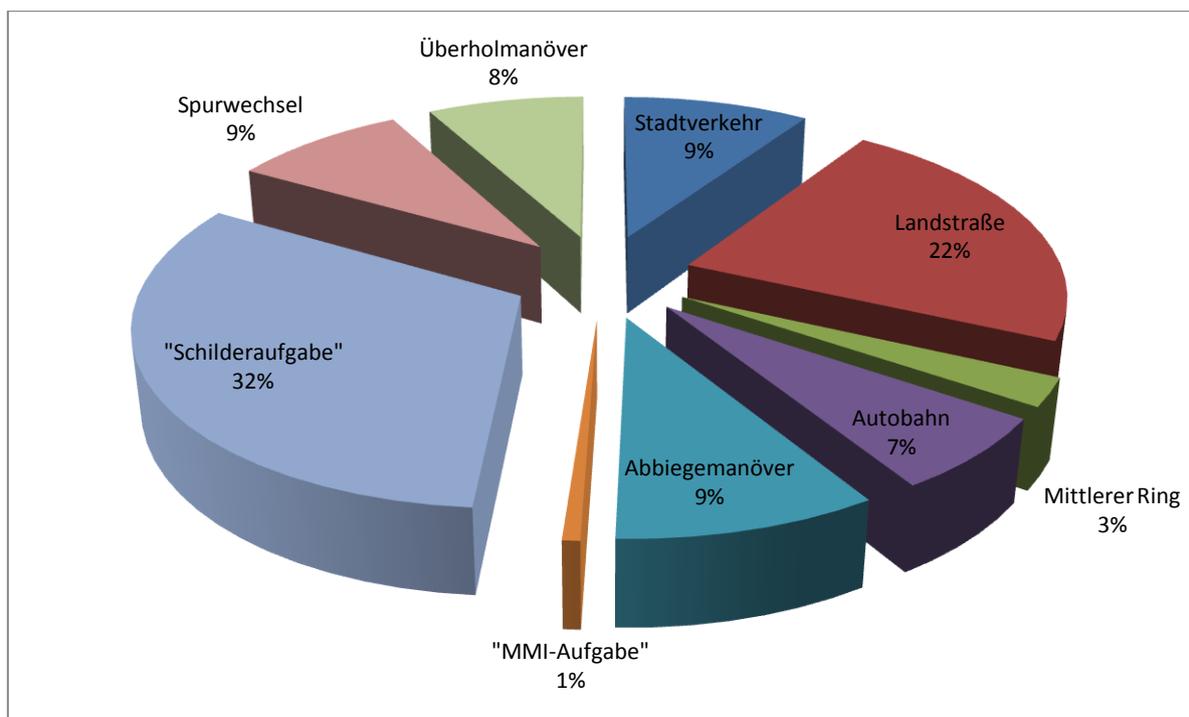


Abbildung 5.11: Prozentuale Verteilung der Klassifikationen "visuelle abgelenkt"

Dem gegenüber wurden ca. 59% der Unaufmerksamkeitsklassifikationen in Situationen außerhalb der Baseline Fahrten, also in Situationen mit erhöhtem bzw. künstlich erzeugtem Ablenkungspotential, generiert. Die Nebenaufgabe „Straßennamen von den entsprechenden Verkehrsschildern ablesen“ weist mit 32% den größten Anteil an korrekten Unaufmerksamkeitsklassifikationen auf (vgl. Abbildung 5.11). Dazu konträr konnte die künstlich induzierte Ablenkung durch eine MMI-Bedienung nicht hinreichend erkannt werden. Lediglich 1% der Klassifikationen fand in Situationen von MMI-Bedienung statt. Anders ausgedrückt entspricht dies einem Wert von 0,18 Klassifikationen pro Minute und liegt damit noch deutlich unter dem Durchschnittswert von 0,23 Klassifikationen pro Minute bei aufmerksamer Fahrt. Bei einer Analyse der Verteilung der zeitlich gewichteten Anzahl der Klassifikationen pro Minute Fahrtdauer (vgl. Abbildung 5.12) ist festzustellen, dass innerhalb der Situationen der Baseline Fahrt auf die Autobahnfahrten mit 0,3 Klassifikationen pro Minute die größte Anzahl von nicht richtigen Klassifikationen entfällt. Alle weiteren Situationen mit erhöhtem Ablenkungspotential, mit Ausnahme der „MMI-Aufgabe“, weisen dem gegenüber deutlich größere durchschnittliche Ablenkungswerte von mindestens 0,5 Klassifikationen pro Minute auf (vgl. Abbildung 5.12).

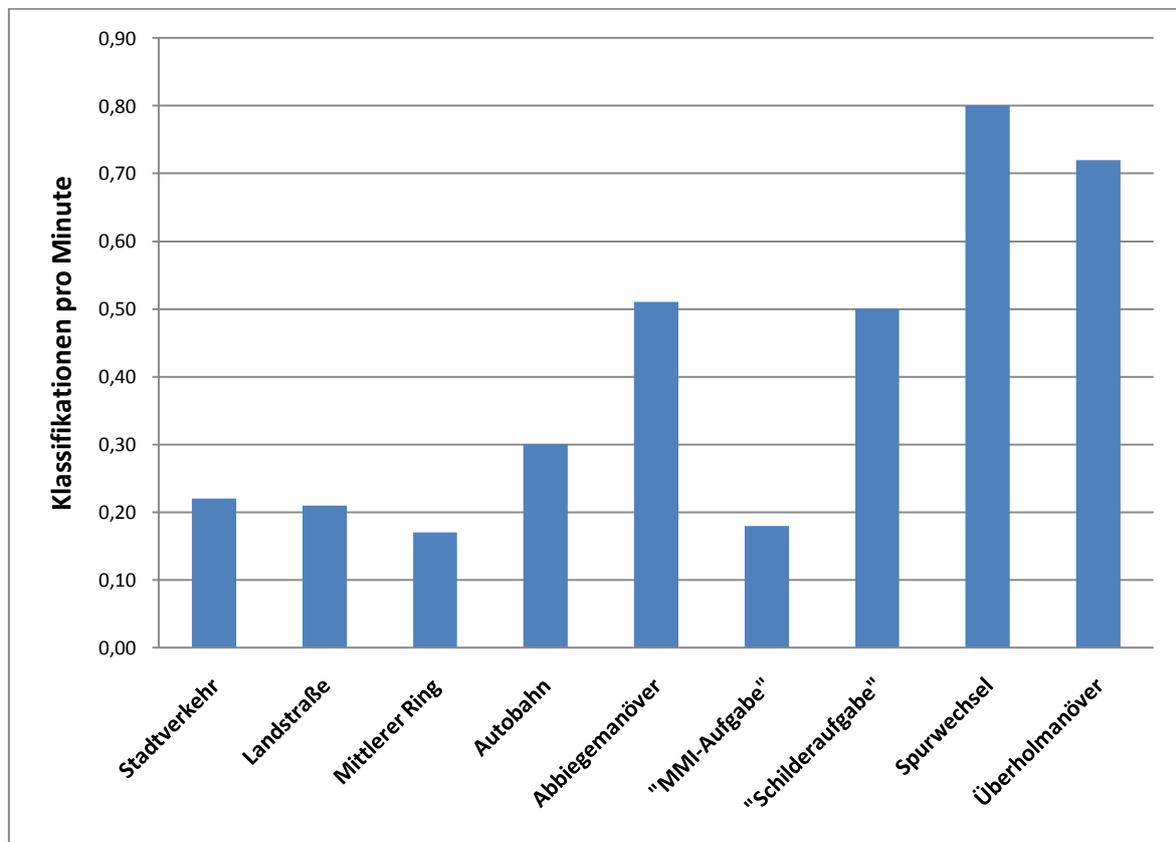


Abbildung 5.12: Anzahl der durchschnittlichen Klassifikationen "visuell unaufmerksam" pro Minute

## 5.4 Fazit

Zum Abschluss dieses Kapitels sollen noch einmal die wesentlichen Ergebnisse der hier vorgestellten Versuchsreihe zusammengefasst werden:

Zum Ersten ist dabei festzuhalten, dass die typische Kopforientierung des Fahrers während der Fahrzeugführung unabhängig vom Straßentyp ist und auch keine signifikanten interindividuellen Unterschiede aufweist.

Zum Zweiten konnte gezeigt werden, dass der Abstand zwischen Blickrichtung und Kopforientierung stark vom jeweiligen Blickort abhängig ist. Wird beispielsweise ein Objekt weit außerhalb des normalen Blickfeldes angesehen, kommt es dabei zu großen Differenzen zwischen Blickrichtung und der Richtung der Gesichtsnormalen (vgl. Abschnitt 2.6.1 „Der visuelle Sinneskanal“ sowie Grüsser (1987)). Die dabei auftretenden Abstände sind stark interindividuell verschieden, aber nicht durch im Zuge dieser Studie erhobene personenbezogene Merkmale zu erklären.

Zum Dritten lässt sich feststellen, dass durch eine Aufmerksamkeitsklassifikation auf der Grundlage einer Aufmerksamkeitsregion, verbunden mit einer kritischen Abwendungsdauer, eine grobe Einschätzung möglich ist, ob ein Fahrer gerade visuell abgelenkt ist oder nicht. Alleine auf Basis dieses Ansatzes ist jedoch keine zuverlässige Aussage über den visuellen Aufmerksamkeitszustand des Fahrers möglich. Visuelle Ablenkung, durch z.B. sekundäre oder tertiäre Fahraufgaben, die eine starke und mitunter längerfristige Kopfabwendung vom vorausfahrenden Verkehr in Größenordnung von größer 1,5s mit sich bringen, ist damit aber relativ gut klassifizierbar. Siehe dazu auch Abschnitt 2.7.1.1 „Berührungslos erfassbare Parameter“.

## 6 Ermittlung der Fahreraufmerksamkeit anhand der Kopforientierung

Grundlage für die in diesem Kapitel beschriebenen Algorithmen zur Bestimmung der Fahreraufmerksamkeit (vgl. Abschnitt 2.3.2) auf Basis eines monokularen kamerabasierten Fahrerbeobachtungssystems (vgl. Abschnitt 3.3.1) bilden die Ergebnisse der Versuchsreihen aus Kapitel 4 und 5 sowie die aus der Literatur zusammengetragenen Erkenntnisse in Abschnitt 2.7.1.1.

Dabei scheint ein Ansatz basierend auf der Ausrichtung des Blickfeldes (vgl. Abschnitt 2.6.1), respektive auf Basis der Kopforientierung des Fahrers, als sinnvoll (vgl. auch Zhang (2008)). Ein solcher Ansatz muss allerdings gleichzeitig robust gegenüber messprinzipbedingter Ungenauigkeiten eines monokularen Driver Monitoring Systems sein (vgl. Abschnitt 4.4) sowie außerdem flexibel auf die interindividuellen Unterschiede im Kopforientierungsverhalten verschiedener Fahrer reagieren können (vgl. Abschnitt 5.4). Aufgrund dieser beiden wesentlichen Randbedingungen scheint ein Algorithmus, dessen Ausgabeparameter über eine binäre Entscheidung „Fahrer aufmerksam“ vs. „Fahrer unaufmerksam“ hinausgehen, weder zuverlässig realisierbar noch zielführend.

Ähnlich der von den Autoren Zhang et al. (2004) beschriebenen Herangehensweise hinsichtlich einer „Aufmerksamkeitsregion“, werden in den folgenden beiden Teilkapiteln zwei Algorithmen zur Bestimmung des visuellen Aufmerksamkeitsfokus vorgestellt und anschließend verglichen.

### 6.1 Statische Aufmerksamkeitsregion

Der in diesem Abschnitt beschriebene Algorithmus zur Bestimmung des visuellen Aufmerksamkeitsfokus des Fahrers basiert auf einer Überprüfung der Kopforientierung und somit der Ausrichtung des Blickfeldes. Die Entscheidung, ob ein Fahrer als aufmerksam identifiziert wird oder nicht, hängt dabei davon ab, ob der Fahrerkopf auf einen bestimmten Bereich der Windschutzscheibe ausgerichtet ist oder nicht. Dieser Bereich wird im Rahmen dieser Arbeit als „Region of Interest“ (ROI) bezeichnet. Es handelt sich dabei um einen rechteckförmigen Bereich, der sich zentral vor dem Fahrer befindet. Schneidet der Kopfrichtungsvektor diesen Bereich, wird davon ausgegangen, dass der Fahrer sich auf den weiteren Straßenverlauf und den Verkehr konzentriert und seine visuelle Aufmerksamkeit (vgl. Abschnitt 2.3.1 „Selektive Aufmerksamkeit“) nicht anderen Dingen in der Fahrzeugumgebung oder im Fahrzeuginnenraum zugewendet ist.

### 6.1.1 Funktionsweise

Aufbauend auf den in Abschnitt 3.3.1.3 beschriebenen Ausgabeparametern des DSS Systems sowie den Transformationsvorschriften der zugrundeliegenden Koordinatensystemen kann die Kopforientierung des Fahrers im Weltkoordinatensystem für jedes Frame bestimmt werden durch:

$$\vec{R}_{World} = R_{HW}(\Theta, \Psi, \Phi) \cdot \vec{e}_{zHead} \quad 6.1$$

Der Richtungsvektor der Kopforientierung entspricht dabei der negativen z-Richtung des Kopfkoordinatensystems  $\vec{e}_{zHead} = [0, 0, -1]^T$  (vgl. Abbildung 3.13 und Abbildung 3.14). Man erhält Gleichung 6.1 durch Einsetzen von  $\vec{e}_{zHead}$  in Gleichung 3.2 mit  $\vec{t}_{HW} = 0$ . Damit ergibt sich für den Kopfrichtungsvektor in Weltkoordinaten:

$$\vec{R}_{World} = R_{HW}(\Theta, \Psi, \Phi) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \quad 6.2$$

Unter Anwendung der Rotationsmatrizen aus Gleichung 3.6, 3.7 und 3.8 folgt:

$$\vec{R}_{World} = \begin{bmatrix} -\sin(\Psi) \\ \sin(\Theta) \cdot \cos(\Psi) \\ \cos(\Theta) \cdot \cos(\Psi) \end{bmatrix} \quad 6.3$$

Aus dem Kopfrichtungsvektor in Weltkoordinaten  $\vec{R}_{World}$  und dem Ortsvektor  $\vec{t}_{HW}$  lässt sich folgende Gleichung für die Kopfrichtungsgerade mit  $a \in \mathbb{R}$  aufstellen:

$$G = a \cdot \vec{R}_{World} + \vec{t}_{HW} \quad 6.4$$

$$G = a \cdot \begin{bmatrix} -\sin(\Psi) \\ \sin(\Theta) \cdot \cos(\Psi) \\ \cos(\Theta) \cdot \cos(\Psi) \end{bmatrix} + \vec{t}_{HW} \quad 6.5$$

Die Ebene der ROI kann durch 3 Punkte  $P_1, P_2, P_3$  im Weltkoordinatensystem definiert und durch folgende Ebenengleichung mit  $b$  und  $c \in \mathbb{R}$  beschrieben werden:

$$E = P_1 + b \cdot \overrightarrow{P_1 P_2} + c \cdot \overrightarrow{P_1 P_3} \quad 6.6$$

Um nun den Schnittpunkt der Kopfrichtungsgeraden (vgl. Gleichung 6.4) mit der ROI Ebene zu bestimmen, wird die Ebenengleichung (vgl. Gleichung 6.6) mit der Kopfrichtungsgeraden gleichgesetzt:

$$a \cdot \vec{R}_{World} + \vec{t}_{HW} = P_1 + b \cdot \overrightarrow{P_1P_2} + c \cdot \overrightarrow{P_1P_3} \quad 6.7$$

Somit erhält man für den Schnittpunkt S zwischen ROI Ebene und Kopfrichtungsgeraden:

$$S = P_1 + b \cdot \overrightarrow{P_1P_2} + c \cdot \overrightarrow{P_1P_3} - a \cdot \vec{R}_{World} - \vec{t}_{HW} \quad 6.8$$

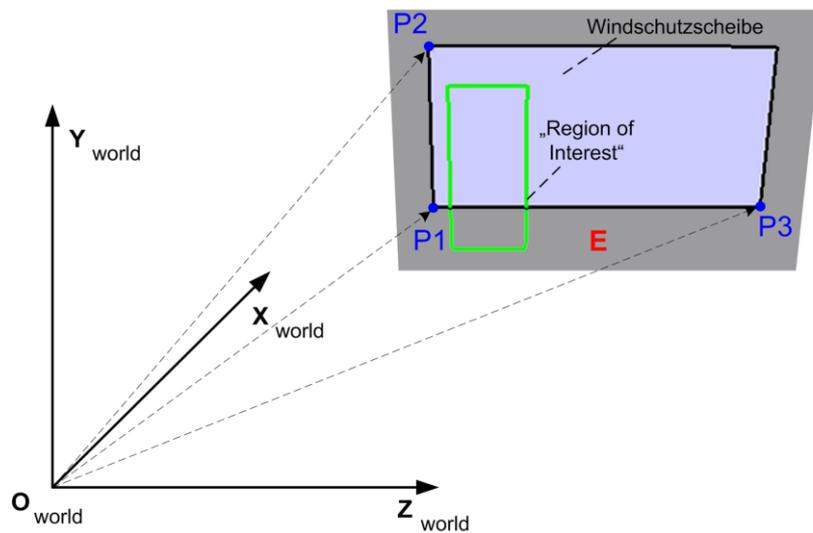


Abbildung 6.1: Schematische Darstellung der ROI Ebene (Terkes, 2007)

Anschließend kann verglichen werden, ob sich der Schnittpunkt innerhalb der ROI (grün dargestelltes Rechteck in Abbildung 6.1) befindet.

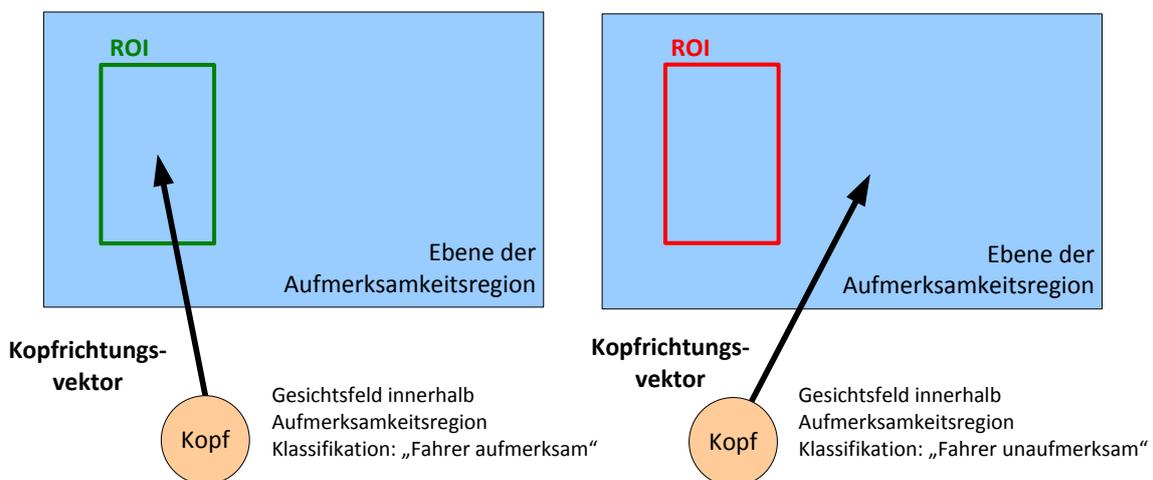


Abbildung 6.2: Gegenüberstellung der Situationen "Fahrer aufmerksam" und "Fahrer unaufmerksam"

Für eine hinreichend belastbare Einschätzung der Fahreraufmerksamkeit ist die in Abbildung 6.2 dargestellte Fallunterscheidung allerdings nicht alleine ausreichend. Hierfür sollte außerdem noch die Dauer der Blickabwendung berücksichtigt werden. Wie in Abschnitt 2.7.1.1 zusammengefasst dargelegt ist, kann davon ausgegangen werden, dass Blickabwendungen mit einer Dauer von über 1,5s als kritisch einzustufen sind. In dem hier vorgestellten Ansatz wurde deshalb definiert, dass, wenn der Schnittpunkt der Kopforientierungsgeraden mit der ROI Ebene länger als 1,5s außerhalb der Aufmerksamkeitsregion (ROI) liegt, der Fahrer als unaufmerksam klassifiziert wird. Im umgekehrten Fall wird eine detektierte Ablenkung erst zurückgenommen, wenn der Fahrer seinen Kopf eine festgelegte Mindestzeit von 0,5s wieder auf einen Bereich innerhalb der ROI ausgerichtet hat. So kann garantiert werden, dass der Fahrer erst wieder als aufmerksam eingestuft wird, wenn er den Verkehr über eine bestimmte Zeitspanne beobachtet hat. Die Funktionsweise des Klassifikationsalgorithmus ist in der folgenden Abbildung 6.3 noch einmal grafisch dargestellt.

### 6.1.2 Bewertung

Wie gut lässt sich nun anhand einer statischen Aufmerksamkeitsregion visuelle Ablenkung des Fahrers erkennen? Mit Blick auf die Ergebnisse der in Kapitel 4 beschriebenen Versuchsreihe wurde eine Analyse der Funktionsfähigkeit einer statischen Aufmerksamkeitsregion unter Verwendung des DSS Systems durchgeführt und einige repräsentative Problemfälle identifiziert. Eine belastbare statistische Bewertung des statischen ROI-Ansatzes in Form einer dedizierten Versuchsreihe fand im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht statt. Auf die identifizierten Problemfälle wird im Weiteren eingegangen.

Als problematisch erweisen sich zum einen die auftretenden Varianzen während des Initialisierungsvorgangs (vgl. Tabelle 4.4) sowie der starke Einfluss von Änderungen der Gesichtsmimik (vgl. Tabelle 4.3) auf die Genauigkeit der Messwerte des Driver State Sensors. Die hierbei auftretenden Offsets, sowohl in der ermittelten Kopfposition als auch  $-rotation$ , wirken sich negativ auf eine aussagekräftige ROI basierte Aufmerksamkeitsbestimmung aus.

Zum anderen entstehen zufällige Fehler z.B. aufgrund interindividueller Unterschiede bei Körpergröße und Kopfhaltung verschiedener Fahrer. Daneben treten intraindividuelle Differenzen auf, da ein Fahrer eine bestimmte Kopfhaltung für gewöhnlich nicht während der gesamten Dauer einer Fahrt beibehält.

Der eigentliche Zielkonflikt entsteht nun dadurch, dass einerseits die ROI möglichst klein gehalten werden sollte, um Kopfabwendungen sicher zu erkennen. Andererseits müssen jedoch durch die wechselnden Kopfposen sowie die systembedingten Messfehler bei dieser fest aufgehängten Aufmerksamkeitsregion Toleranzen vorgesehen werden, so dass diese für jeden Fahrertypus und alle relevanten Fahrsituationen applizierbar ist.

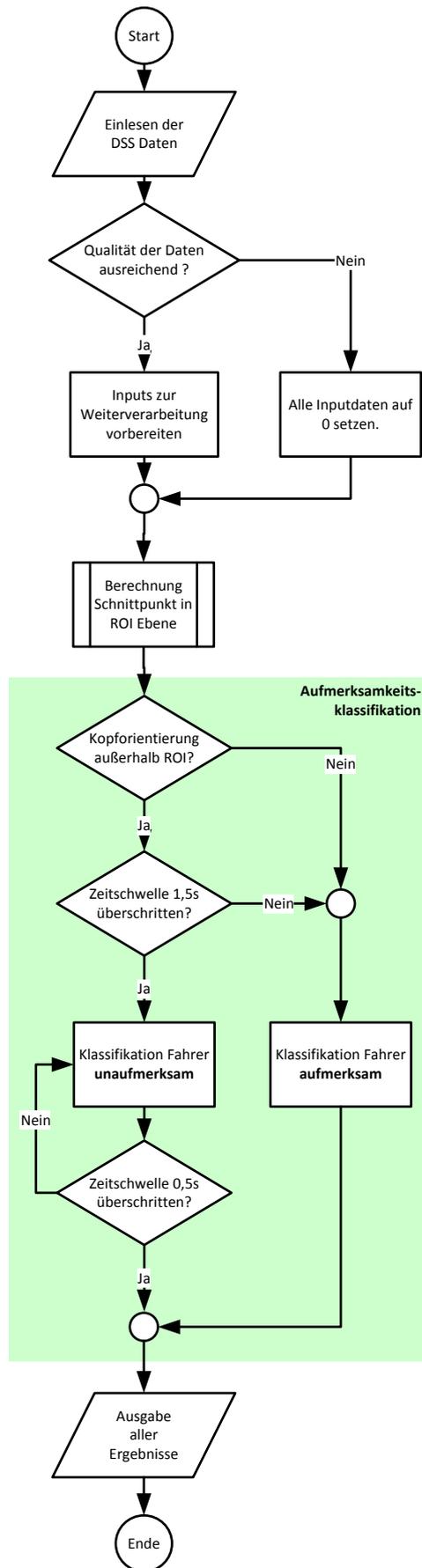


Abbildung 6.3: Vereinfachte schematische Darstellung der Funktionsweise des statischen ROI Algorithmus

## 6.2 Dynamische Aufmerksamkeitsregion

Um den im vorangegangenen Abschnitt 6.1.2 beschriebenen Problemen und systembedingten Fehlern Rechnung zu tragen, wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein zweiter Ansatz zur Aufmerksamkeitsdetektion entwickelt. Dieser basiert auf einer dynamisch geführten Aufmerksamkeitsregion und wird im Folgenden vorgestellt.

Um die Adaption an den Fahrer zu verwirklichen, muss die ROI entsprechend der entstandenen Offsetfehler nachgeführt werden. Diese Nachführung muss dabei so langsam erfolgen, dass kurzfristige Abwendungen der Kopforientierung noch sicher erkannt werden. Als angemessener Zeitraum für eine vollständig erfolgte Nachführung bei sprunghafter Änderung der Kopfrichtung wurde auf Basis der in Kapitel 4 durchgeführten Versuchsfahrten ein Zeitraum von etwa einer Minute ermittelt. Ein weiterer wichtiger Punkt, den es zu beachten gilt, ist derjenige, dass die ROI einen bestimmten zentralen Bereich vor dem Fahrer nicht verlassen darf. Zu diesem Zweck wurde ein Kernbereich definiert, der immer ein Element der verschobenen ROI sein muss. Dies schränkt den Bereich ein, in dem sich die dynamisch angepasste ROI bewegen kann (vgl. Abbildung 6.4).

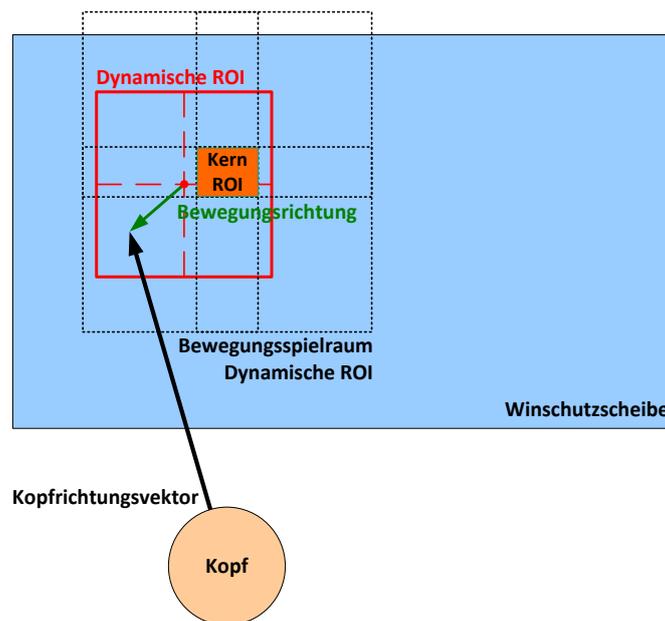


Abbildung 6.4: Bewegungsbereich einer dynamischen Aufmerksamkeitsregion (Schichtl, 2007)

Erkennt die Auswertesoftware des DSS Systems, dass das aktuelle Kopfmodell im Zustand des Trackings (vgl. Abschnitt 3.3.1.3) keine ausreichende Konfidenz aufweist, so wird versucht, das bestehende Kopfmodell neu aufzusetzen. Dadurch ändern sich mitunter die systembedingten Offsetfehler (vgl. Abschnitt 4.3). Dies muss bei der dynamischen Nachführung der Aufmerksamkeitsregion berücksichtigt und die ROI bei einem Neuaufsetzen des Kopfmodells in ihre Ursprungsposition zurückgesetzt werden.

Um die dynamische Nachführung der Aufmerksamkeitsregion zu realisieren, muss die Abweichung „der Kopfrichtung bei Geradeausblick des Fahrers“ vom Ideal erfasst werden. Das definierte Ideal entspricht dabei dem Mittelpunkt der statischen ROI und ist gleichzeitig der Initialwert der dynamisch nachgeführten ROI. Die zu adaptierende Abweichung entspricht also einem Vektor von der statischen ROI Mitte zum Schnittpunkt des Kopfrichtungsvektors mit der Ebene, in der die Aufmerksamkeitsregion festgelegt wurde.

Da nicht sicher davon ausgegangen werden kann, dass der Abweichungsvektor in jedem Frame die tatsächliche typische Abweichung der Kopforientierung eines Fahrers vom Ideal repräsentiert, ist es sinnvoll, den Abweichungsvektor über eine gewisse Zeitdauer gemittelt zu betrachten. Ein gleitender Mittelwertfilter mit einer Zeitkonstante von ca. 1min hat sich in den durchgeführten Untersuchungen als geeignet erwiesen. Über diese Zeitdauer kann bei einer Fahrt ab einer bestimmten Geschwindigkeit (z.B. >30 km/h) angenommen werden, dass ein Fahrer seinen Blick hauptsächlich nach vorne richtet. Der Mittelwert der Abweichungsvektoren liefert damit den Mittelpunkt der nachgeführten ROI.

### 6.2.1 Funktionsweise

Aufbauend auf dem im Abschnitt 6.1.1 beschriebenen Aufmerksamkeitsdetektionsalgorithmus mit einer statischen ROI, soll im Folgenden die Funktionsweise eines Algorithmus basierend auf einer dynamisch nachgeführten Aufmerksamkeitsregion näher erläutert werden. In Abbildung 6.5 ist dessen Funktionalität vereinfacht schematisch dargestellt.

Zu Beginn der Berechnungen werden zunächst die Messgrößen des DSS Systems eingelesen (vgl. Tabelle 3.3). Diese Daten repräsentieren die aktuelle Gesichtsfeldausrichtung des Fahrers bzw. kann diese daraus berechnet werden (vgl. Abschnitt 6.1.1). Bevor die Daten zur Weiterverarbeitung vorbereitet werden, erfolgt eine Qualitätsprüfung. Das Maß für die Qualität der Trackingdaten wird von der Bildverarbeitungssoftware des Driver State Sensors zur Verfügung gestellt (vgl. Tabelle 3.3). Unterschreitet diese einen bestimmten Sollwert, z.B. 75%, werden die Daten verworfen. Sind die Daten hingegen gültig, wird an dieser Stelle des Algorithmus der Schnittpunkt der Kopforientierungsgeraden mit der Ebene der Aufmerksamkeitsregion (vgl. Abschnitt 6.1.1) sowie der sich daraus ergebende Abweichungsvektor des Mittelpunktes der dynamischen ROI berechnet. Bevor nun die Adaption der ROI an die Kopforientierung des Fahrers stattfindet, wird überprüft, ob das Kopfmodell für die vorliegenden Daten neu aufgesetzt wurde. Ist dies der Fall, wird die ROI Nachführung zurückgesetzt. Um dies zu erreichen, wird das Datenzeitfenster, welches die Historie der Kopforientierungsdaten zur Mittelwertberechnung enthält, komplett gelöscht und neu initialisiert.

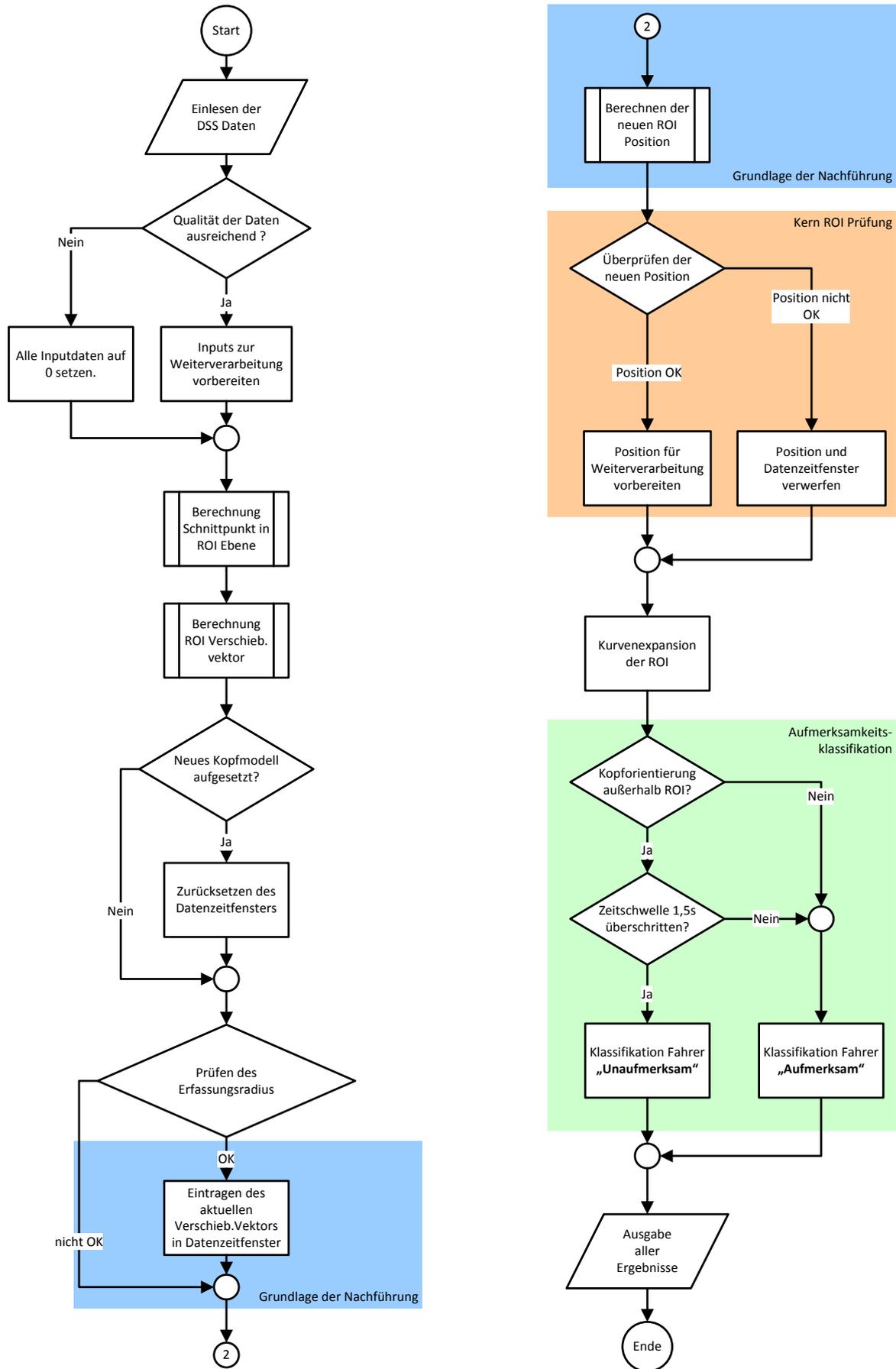
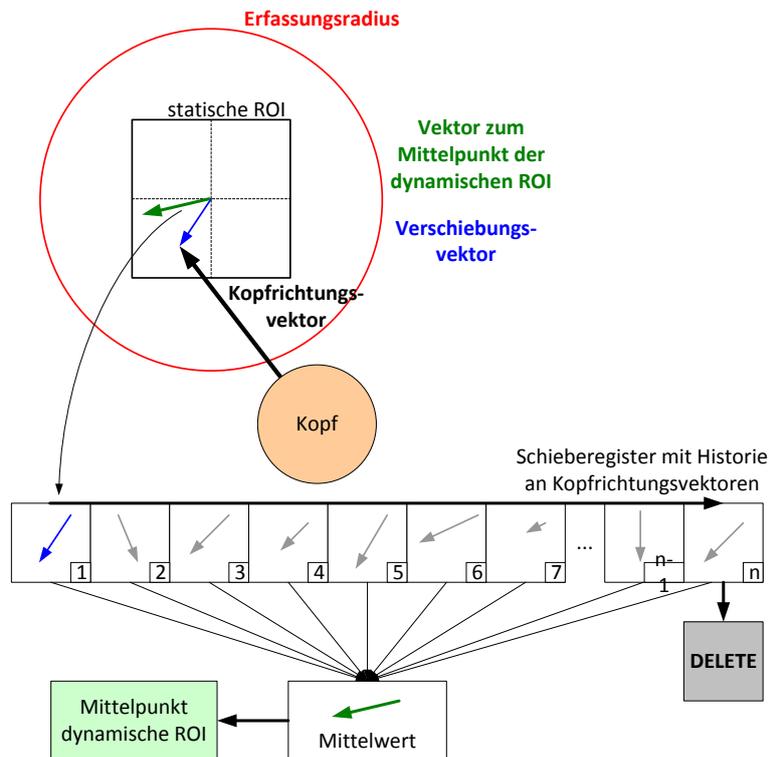


Abbildung 6.5: Vereinfachte schematische Darstellung der Funktionsweise des dynamischen ROI Algorithmus

Bevor der aktuelle Kopfrichtungsvektor in das Datenzeitfenster eingetragen wird, müssen weitere Kriterien erfüllt sein. Es wird beispielsweise überprüft, ob der Schnittpunkt der Kopfrichtungsgeraden innerhalb eines Erfassungsradius um die ROI liegt (vgl. Abbildung 6.6). Der Wahrnehmungsradius bezieht sich auf die Mitte der Kern ROI, und verhindert, dass zu stark abweichende, möglicherweise fehlerhafte Kopforientierungsvektoren die Nachführung negativ beeinflussen.

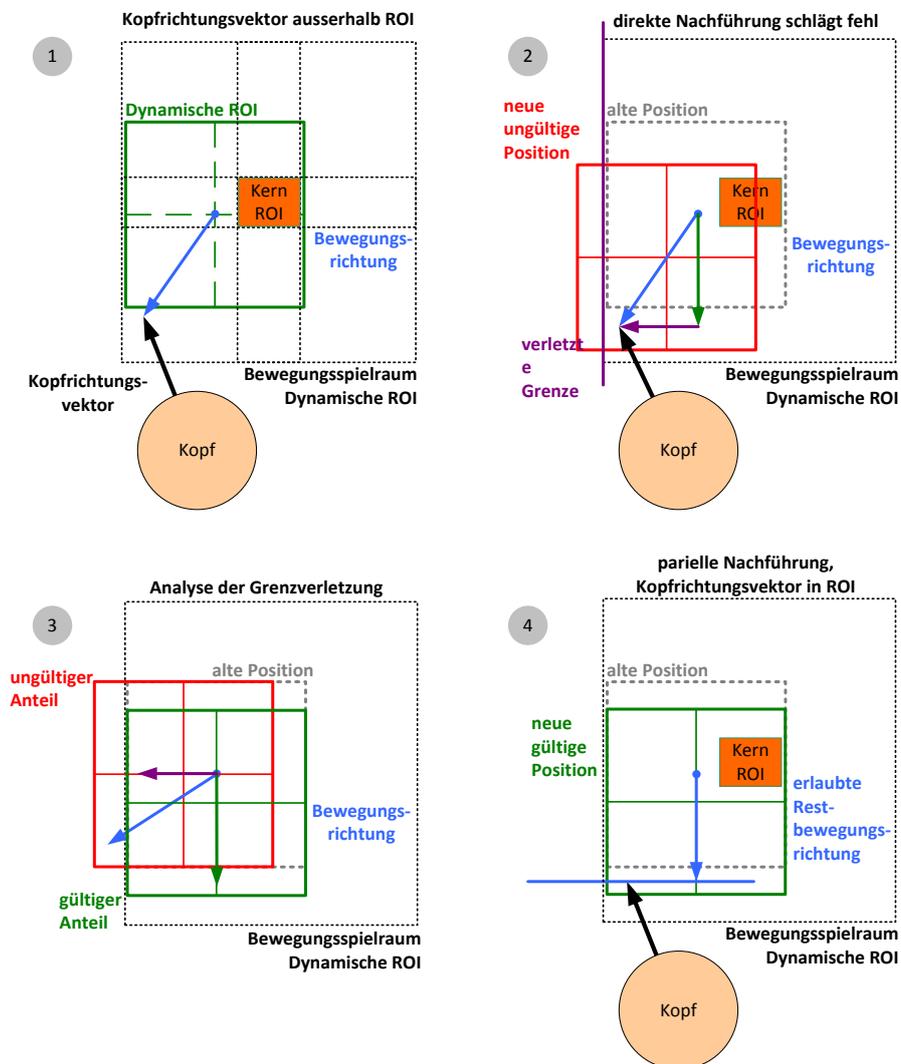


**Abbildung 6.6: Funktionsweise des Erfassungsradius und des Datenzeitfensters zur Mittelwertbildung des ROI Adaptionsvektors (Schichtl, 2007)**

Wurden alle zuvor angegebenen Kriterien positiv geprüft, so wird nun der aktuelle Kopforientierungsvektor in das Datenzeitfenster eingetragen. Dabei geht der älteste Wert verloren. Die Länge des Datenzeitfensters richtet sich nach der Einstellung für die Einschwingzeit der Nachführung. Die Adaption ist dann eingeschwungen, wenn die Nachführung der ROI von einem Punkt zum nächsten vollständig abgeschlossen ist. Dies geschieht durch einen vollständigen Austausch aller Einträge im Datenzeitfenster. Aus der Einschwingzeit und der Framerate des Driver State Sensors von 60Hz ergibt sich so die Länge des Datenzeitfensters durch das Produkt aus Datenrate und Einschwingzeit (ca. 1min).

Aus den Einträgen der Kopfrichtungsvektoren im Datenzeitfenster lässt sich ein Mittelwert bilden. Genauer betrachtet wird ein Mittelwert aus den Differenzvektoren von Kern ROI Mitte und

Kopfrichtungsvektor errechnet. Dieser Mittelwert dient als neue Mitte für die dynamisch nachgeführte ROI.



**Abbildung 6.7: Betrachtung der einzelnen Komponenten des ROI Verschiebungsvektors bei Verletzung des Kern ROI Kriteriums (Schichtl, 2007)**

Die neu berechnete dynamische ROI hat eine Nebenbedingung zu erfüllen: Die Kern ROI muss, wie bereits eingangs erläutert, vollständig innerhalb der dynamischen ROI liegen (vgl. Abbildung 6.7). Es muss also zunächst geprüft werden, ob diese Bedingung erfüllt ist. Wird das Kriterium verletzt, so wird prinzipiell der letzte Eintrag in das Datenzeitfenster verworfen und der alte wiederhergestellt. Detaillierter betrachtet wird dabei überprüft, in welcher Bewegungsrichtung die Verletzung des Kern ROI Kriteriums erfolgt ist, um die dynamische ROI an der Kante der Kern ROI „entlang gleiten“ lassen zu können. Der Bewegungsrichtungsvektor wird hierfür in seine einzelnen Komponenten zerlegt. Dies ermöglicht ein vollständiges Ausnutzen des Bewegungsspielraumes um die Kern ROI. Ohne die

dedizierte Betrachtung der einzelnen Vektorkomponenten würde die Region bei dem Versuch weiter nachzuführen immer wieder zurückgesetzt werden und der eventuell noch mögliche Adaptionsbereich in nur noch einer Raumrichtung bliebe ungenutzt (vgl. Abbildung 6.7).

Der auf die Kern ROI Prüfung folgende Algorithmusteil erlaubt es, die Größe der ROI in Abhängigkeit vom Fahrbahnverlauf anzupassen. Die ROI wird bei Kurvenfahrten in Richtung der jeweiligen Kurve leicht vergrößert. Dies geschieht unter der Annahme, dass sich die Kopfrichtung des Fahrers leicht in Richtung der Kurve orientiert. Die Detektionsergebnisse können so bei Kurvenfahrten erheblich verbessert werden. Die Information über die Orientierung einer vorausliegenden Kurve bzw. deren geschätzter Krümmungsradius wird dabei dem LDW-System (vgl. Tabelle 3.1 und Kapitel 3.1.2) entnommen.

Anschließend wird geprüft, ob der zuvor berechnete Schnittpunkt der Kopfrichtungsgeraden mit der ROI Ebene innerhalb der dynamisch nachgeführten ROI liegt. Ist dabei die Kritikalitätsschwelle von 1,5s überschritten, wird der Fahrer als „Unaufmerksam“ klassifiziert, anderenfalls als „Aufmerksam“. Abschließend werden die Ergebnisse aufbereitet und anderen Funktionsblöcken zur Verfügung gestellt (vgl. Kapitel 7).

### 6.2.2 Bewertung

Zum Vergleich der Algorithmen der dynamischen und der statischen Aufmerksamkeitsregion wurden ein Teil der aufgezeichneten Messwerte der im Rahmen von Kapitel 4 beschriebenen Versuchsfahrten herangezogen.

Es wurde verglichen, welcher Ansatz (Dynamische vs. Statische ROI) eine bessere Situationsklassifikation erreicht. Um Aussagen dahingehend zu ermöglichen, wurde der prozentuale Anteil der korrekten Klassifikationen des Fahrers als „aufmerksam“ bzw. „unaufmerksam“ auf der Grundlage der aufgezeichneten Testszenarien gegenübergestellt. Der prozentuale Anteil der korrekten Klassifikation des Fahrers als „aufmerksam“ lässt allerdings in diesem Zusammenhang lediglich Rückschlüsse darüber zu, welchen Anteil der Fahrt der Fahrer sein Gesichtsfeld zentral auf den vorausfahrenden Verkehr ausgerichtet hatte. Entscheidender für die Beurteilung der Systemleistung ist hingegen das Klassifikationsergebnis in Situationen tatsächlicher Fahrerablenkung. Ein Fahrer wird dabei, wie bereits beschrieben, als abgelenkt eingestuft, wenn seine Kopforientierung für mehr als 1,5s außerhalb der jeweiligen ROI liegt.

Die erhaltenen Ergebnisse lassen sich in drei Kategorien unterteilen:

1. *Die Situationsklassifikation durch die dynamische ROI ist deutlich besser als durch die statische ROI:*

Dieser Fall tritt dann auf, wenn die typische Kopforientierung des Fahrers bei aufmerksamer Fahrweise in die Nähe einer Kante der statischen ROI fällt. Die korrekte Klassifikation unter Verwendung der statischen ROI bewegt sich in diesem Fall lediglich in Größenordnung von 50% aller erfassten Messwerte bei aufmerksamer Fahrweise. Das führt dazu, dass mit einer statischen ROI eine große Anzahl an Fehlklassifikationen generiert wird, da der Kopforientierungsvektor des Fahrers häufig länger als 1,5s die Aufmerksamkeitsregion verlässt.

Die dynamisch nachgeführte ROI kann diese Unzulänglichkeit schnell, etwa innerhalb von 50% der Nachführungszeit von 1min, ausgleichen und erreicht so eine deutlich bessere Situationsklassifikation in 71% der Problemfälle.

2. *Die Situationsklassifikation durch die dynamische ROI ist besser oder gleich gut gegenüber der Klassifikation durch die statischen ROI:*

Dieser Fall tritt bei den verwendeten Testdaten am häufigsten auf. Die nachgeführte ROI kompensiert dabei die interindividuellen Unterschiede im Kopfbewegungsverhalten der Fahrer (vgl. Kapitel 5) sowie die Unzulänglichkeiten des Trackingsystems (vgl. Kapitel 4) am besten und reduziert die Anzahl der Fehlklassifikationen um 91% gegenüber dem statischen ROI Ansatz.

3. *Die Situationsklassifikation durch die dynamische ROI ist schlechter als die durch die statische ROI:*

Entspricht die statische ROI zufällig ideal dem Blickverhalten eines Fahrers, so ist die dynamisch ROI mit ihrer, wenn auch trägen, Nachführung im Nachteil. Die negativen Auswirkungen sind jedoch nicht signifikant. Bei den durchgeführten vergleichenden Untersuchungen trat nur ein solcher Fall auf.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich der dynamische ROI Ansatz besser zur Erkennung von visueller Ablenkung des Fahrers eignet. In 85% der herangezogenen Testfälle wurde durch den dynamischen ROI Ansatz eine korrekte Klassifikation bei visueller Abwendung bzw. aufmerksamer Fahrweise (Gesichtsfeldzuwendung auf den vorausfahrenden Verkehr) erreicht. Die Klassifikation auf Basis der Kopforientierung wurde damit deutlich verbessert und die Anzahl der Klassifikationsfehler drastisch reduziert.

# **7 Adaption von FAS hinsichtlich veränderlicher Fahreraufmerksamkeit**

In diesem Kapitel wird am Beispiel von zwei Fahrerassistenzsystemen gezeigt, wie sich deren Warnstrategien an eine visuelle Ablenkung des Fahrers anpassen lassen. Im ersten Teil des Kapitels wird eine fahreraufmerksamkeitsadaptive Auslegung der Übernahmeaufforderung (engl. TOR – Take Over Requests) eines Abstandsgesteuerten Tempomaten (engl. ACC – Adaptive Cruise Control System) vorgestellt und deren Funktionalität anhand der Ergebnisse einer Probandenstudie diskutiert. Bei einem System mit ersetzender Assistenz, wie es ein Abstandsregeltempomat hinsichtlich der Fahrzeuglängsführung darstellt, sind gerade Zustandsübergänge vom automatisierten zum nicht automatisierten Fahren mit einem Anforderungswechsel im Bezug auf die Fahreraufmerksamkeit verbunden (vgl. Abschnitt 3.1). Auf einen solchen, in bestimmten Fahrsituationen notwendigen Zustandsübergang, wird der Fahrer durch die Übernahmeaufforderung (engl. Take Over Request – TOR) des ACC-Systems hingewiesen (vgl. Abschnitt 3.1.1.2).

Im zweiten Teil des Kapitels wird eine fahreraufmerksamkeitsabhängige Auslegung eines warnenden FAS (vgl. Abschnitt 3.1) am Beispiel eines LDW-Systems vorgestellt, dessen Funktionsweise erläutert sowie die erreichte Funktionalität im Rahmen einer Versuchsreihe untersucht und diskutiert.

Bei beiden FAS Adaptionen kommt der in Kapitel 6 beschriebene Algorithmus mit dynamisch nachgeführter Aufmerksamkeitsregion zum Einsatz. Die jeweiligen Warnstrategien der FAS werden einerseits so modifiziert, dass einem abgelenkten Fahrer mehr Zeit zum Reagieren eingeräumt wird. Andererseits wird durch die Adaption der Warnstrategie versucht, die Akzeptanz des jeweiligen FAS zu erhöhen, da von aufmerksamen Fahrern als zu früh empfundene Warnungen unterbunden werden (vgl. Abschnitt 2.8).

## **7.1 Fahreraufmerksamkeitsadaptive**

### **Übernahmeaufforderung eines ACC-Systems**

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein Algorithmus entwickelt, der es ermöglicht, den Take Over Request eines ACC-Systems an visuelle Ablenkung des Fahrers anzupassen.

Die Übernahmeaufforderung erfolgt in kritischen Verkehrssituationen, die ACC nicht mehr beherrschen kann (vgl. Abschnitt 3.1.1). In diesen Situationen wird eine akustische und optische

Warnung ausgegeben, die den Fahrer dazu auffordert, die vollständige Kontrolle über das Fahrzeug wieder zu übernehmen.

Würde schon bei weniger kritischen Situationen eine Warnung erfolgen, könnte dies zu einer gesenkten Akzeptanz des Systems führen. Einem Fahrer, welcher aufmerksam das Verkehrsgeschehen beobachtet, würden diese Situationen meist als leicht beherrschbar erscheinen. Man geht deshalb bei einer herkömmlichen Parametrierung des Systems von einem aufmerksamen Fahrer aus. Eine für einen wachsamem Menschen unkritische Situation kann für einen abgelenkten Fahrzeugführer schon gefährlich sein. Es ist sinnvoll, im Falle von Ablenkung den Zeitpunkt der Warnung vorzuziehen, um dem Fahrer einen größeren Zeitraum für Reaktionen einzuräumen. Knoll (2007) schreibt dazu mit Blick auf vorausschauende Sicherheitssysteme, dass bereits durch eine Vorverlagerung der Fahrreaktion um eine halbe Sekunde über die Hälfte an Kollisionen vermieden werden kann. Daraus ergibt sich die erste Möglichkeit der Adaption des Take Over Request, das zeitliche Vorziehen der Übernahmeaufforderung.

Je nach Grad der Unaufmerksamkeit wäre es auch denkbar, die Intensität der Warnungen zu quantifizieren. Da allerdings auf Basis des dynamischen ROI Ansatzes (vgl. Abschnitt 6.2) nur eine ja/nein Aussage über die Fahreraufmerksamkeit getroffen werden kann und sich typischerweise die Zeitspanne für ein Vorziehen der Übernahmeaufforderung im Bereich unterhalb 1s bewegt, ist eine Quantifizierung der Warnintensität nicht sinnvoll (vgl. Abschnitt 2.8).

Ist der Fahrer aufmerksam und überschreitet bewusst die Grenzen der Regelung, so erhält er bei herkömmlicher Systemauslegung eine Übernahmeaufforderung. Die Ausgabe einer Warnung in dieser Situation wird in den meisten Fällen als störend empfunden. Eine Adaption zur Steigerung der Akzeptanz durch das Abschwächen der Intensität, das zeitliche Verzögern oder das vollkommene Unterdrücken einer TOR-Warnung könnte hier Anwendung finden. Diese Adaptionmöglichkeiten sind allerdings unter dem Blickpunkt der Risikokompensation (vgl. Abschnitt 2.8.5) für ein „ersetzendes Fahrerassistenzsystem“ (vgl. Buld und Krüger (2002) sowie Kapitel 2.8) als sehr kritisch zu beurteilen und wurden deshalb im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter verfolgt.

### 7.1.1 Funktionsweise

Die grundlegende Funktionsweise des TOR-Algorithmus ist in Abschnitt 3.1.1.2 beschrieben. Für ein Vorziehen der Übernahmeaufforderung bei abgelenktem Fahrer ist es notwendig, die Auslösekriterien bezüglich des absoluten Abstandes, des relativen Abstandes und der absoluten Beschleunigung entsprechend anzupassen. Dies erfolgt auf der Grundlage einer zeitlichen Prädiktion des weiteren Verlaufs der aktuellen Verkehrssituation anhand der Größen  $d$ ,  $v_{rel}$  und  $a_{zo}$ . D.h. es werden die zeitlichen Verläufe  $d(t)$ ,  $v_{rel}(t)$ ,  $a_{zo}(t)$  bezogen auf den erfassten vorausfahrenden

Verkehr ermittelt und im Hinblick auf eine drohende kritische Situation untersucht. Es kann dabei von folgender Annahme ausgegangen werden:  $\dot{a} = \frac{da}{dt} = const.$

Legende der verwendeten Größen:

$v_{ref}$  = Geschwindigkeit des eigenen Fahrzeugs

$v_{rel}$  = Relativgeschwindigkeit zum vorausfahrenden Fahrzeug

$a_{zo}$  = Beschleunigung des vorausfahrenden Fahrzeugs

Damit ergibt sich für die Vorausberechnung des Abstandes  $d(t)$  der folgende Zusammenhang:

$$\begin{aligned}
 s(t) &= \iiint \dot{a} \\
 s(t) &= s_0 + v_0 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot a_0 \cdot t^2 + \frac{1}{6} \cdot \dot{a}_0 \cdot t^3 \\
 d(t) &= s_2(t) - s_1(t) \\
 d(t) &= \left[ \frac{1}{2} \cdot a_{zo} \cdot t^2 + \frac{1}{6} \cdot \dot{a}_{zo} \cdot t^3 + s_2 + (v_{ref} + v_{rel_0}) \cdot t \right] \\
 &\quad - \left[ \frac{1}{2} \cdot \dot{v}_{ref} \cdot t^2 + s_1 + v_{ref} \cdot t \right] \\
 d(t = t_1) &= d_{t=t_0} + t \cdot v_{rel_{t=t_0}} + \frac{t^2}{2} \cdot (a_{zo_{t=t_0}} - \dot{v}_{ref_{t=t_0}}) + \frac{t^3}{6} \cdot \dot{a}_{zo_{t=t_0}}
 \end{aligned} \tag{7.1}$$

Für die Relativgeschwindigkeit folgt analog:

$$\begin{aligned}
 v(t) &= \iint \dot{a} \\
 v(t) &= v_0 + a_0 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot \dot{a}_0 \cdot t^2 \\
 v_{rel}(t) &= v_2(t) - v_1(t) \\
 v_{rel}(t) &= \left[ v_{ref} + v_{rel_0} + a_{zo} \cdot t + \dot{a}_{zo} \cdot \frac{t^2}{2} \right] - [\dot{v}_{ref} \cdot t + v_{ref}] \\
 v_{rel}(t = t_1) &= v_{rel_{t=t_0}} + t \cdot (a_{zo_{t=t_0}} - \dot{v}_{ref_{t=t_0}}) + \frac{t^2}{2} \cdot \dot{a}_{zo_{t=t_0}}
 \end{aligned} \tag{7.2}$$

Für die Beschleunigung des vorausfahrenden Fahrzeugs gilt:

$$a_{zo}(t) = \int \dot{a}_{zo0}$$

$$a_{zo}(t = t_1) = a_{zo_{t=t_0}} + \dot{a}_{zo_{t=t_0}} \cdot t \tag{7.3}$$

Ausgehend von den aktuellen Größen  $d$ ,  $v_{rel}$  und  $a_{zo}$  bezogen auf ein vorausfahrendes Zielobjekt zum Zeitpunkt  $t = t_0$  kann also unter Verwendung der Berechnungsvorschriften 7.1 bis 7.3 auf dessen Zustand zum Zeitpunkt  $t = t_1$  in der Zukunft geschlossen werden. Dabei gilt:  $t_1 = t_0 + \Delta t$  Wobei  $\Delta t$  die Zeitspanne angibt, um den die TOR-Warnung vorgezogen werden soll.

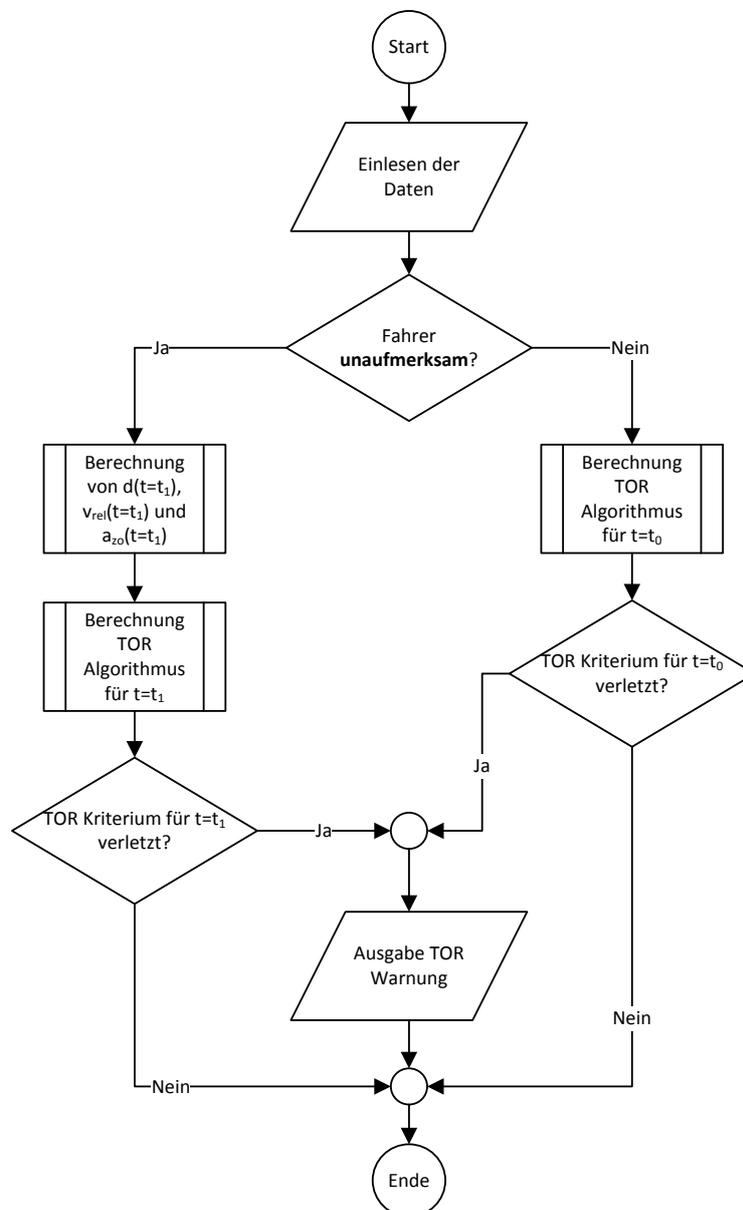


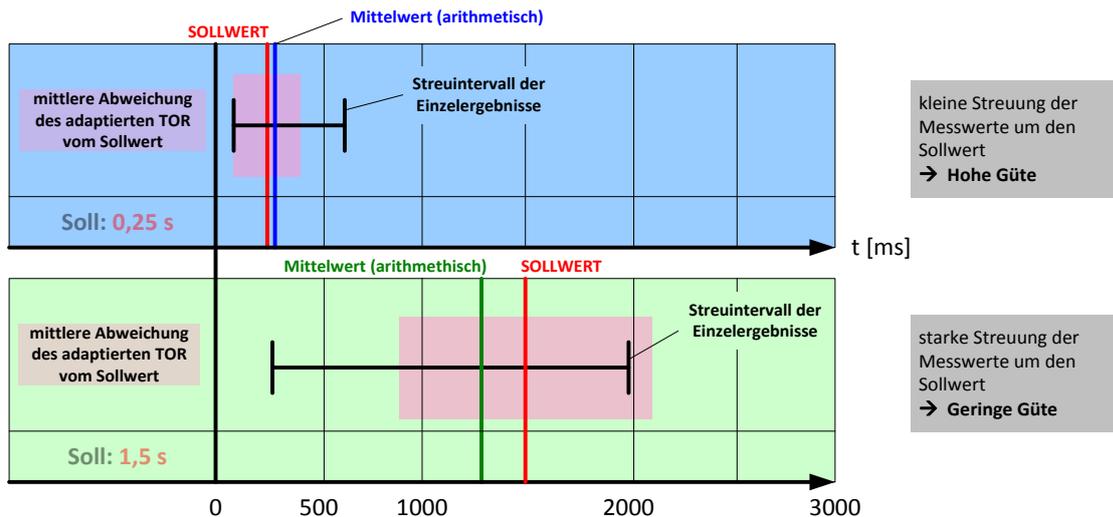
Abbildung 7.1: Funktionsweise des fahreraufmerksamkeitsadaptiven TOR-Algorithmus

Wird anhand der prädizierten Größen für das vorausfahrende Fahrzeug eine TOR-Berechnung durchgeführt, so erfolgt im Idealfall eine um den Zeitraum  $\Delta t$  vorgezogene Übernahmeaufforderung. Dies impliziert jedoch, dass sich die zur Berechnung verwendeten Größen während der Dauer  $\Delta t$  nicht verändern. Darüberhinaus kann das Vorziehen einer Warnung nur in solchen Fällen erfolgen, in denen die Daten des ACC-Sensors bereits auf eine mögliche kritische Situation hindeuten.

In dem in Abbildung 3.16 dargestellten Versuchsaufbau wurde ein herkömmlicher TOR-Algorithmus (vgl. Abschnitt 3.1.1.2) auf dem Messlaptop zusammen mit dem Aufmerksamkeitsdetektionsalgorithmus auf der Grundlage einer dynamisch nachgeführten Aufmerksamkeitsregion (vgl. Abbildung 6.5) implementiert. Im Falle eines als „aufmerksam“ klassifizierten Fahrers erfolgt die TOR-Berechnung auf Basis der aktuell gemessenen Parameter  $d(t = t_0)$ ,  $v_{rel}(t = t_0)$  und  $a_{zo}(t = t_0)$ . Wird ein Fahrer hingegen als „unaufmerksam“ erkannt, werden zuerst die prädiktiven Größen  $d(t = t_1)$ ,  $v_{rel}(t = t_1)$  und  $a_{zo}(t = t_1)$  berechnet und anhand dieser überprüft, ob eine Übernahmeaufforderung ausgelöst werden muss (vgl. Abbildung 7.1).

Wie bereits angedeutet, kann der Auslösezeitpunkt des TOR nicht beliebig weit vorgezogen werden. Die maximal mögliche Zeit  $\Delta t$ , die eine Warnung vorgezogen werden kann, ist die, zu welcher der ACC-Sensor Daten erhält, die auf eine kritische Situation schließen lassen. Ein praktisches Beispiel hierfür ist eine unvermittelte Bremsung eines vorausfahrenden Fahrzeugs. Eine Warnung kann frühestens zu dem Zeitpunkt erfolgen, zu dem der Sensor die Bremsung detektiert. Es lässt sich also ableiten, dass bei einer bestimmten geforderten Adaptionzeit diese in Abhängigkeit von der betrachteten Verkehrssituation kausal nicht immer erreicht werden kann. Für kleinere Adaptionzeiten  $\Delta t$  kann antizipiert werden, dass der Algorithmus zum Vorziehen der Warnung eine bessere Güte erreicht. Als Güte wird in diesem Zusammenhang verstanden, inwieweit die tatsächlich vorgezogene Auslösezeit der adaptierten Übernahmeaufforderung von der Sollauslösezeit abweicht. Eine Auswertung von 12 TOR-Szenarien bei verschiedenen Solladaptionzeiten ergab Folgendes (vgl. auch Abbildung 7.2):

Bei  $\Delta t = 0,25s$  Solladaptionzeit tritt eine mittlere Abweichung von  $0,16s$  von diesem Zielwert auf. Diese Abweichung ist bedingt durch zufällige systematische Fehler in der Datenerfassung. So liegt den Datensamples des ACC-Sensors eine Zeitgranularität von nur  $100ms$  zugrunde.



**Abbildung 7.2:** Darstellung der Auswertung zweier unterschiedlicher Solladaptionszeiten (Trefflich, 2008b)

Bei  $\Delta t = 1,5s$  Solladaptionszeit wird eine mittlere Abweichung von 0,61s vom Zielwert erreicht. Dieser Wert ist somit deutlich schlechter als bei einer kürzeren Adaptionszeit. Hauptgrund hierfür ist die bereits beschriebene Tatsache, dass 1,5s eine zu große Zeitspanne darstellen, um im Vorfeld anhand der Zeitverläufe von  $d$ ,  $v_{rel}$  und  $a_{zo}$  eine kritische Situation korrekt präzidieren zu können.

Für die im folgenden Abschnitt 7.1.2 beschriebene Probandenstudie zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit des adaptiven TOR-Algorithmus wurde deshalb eine Solladaptionszeit von  $\Delta t = 0,75s$  gewählt. Diese Wahl bildet einen Kompromiss hinsichtlich zuverlässiger Umsetzbarkeit und Sinnhaftigkeit.

Wird eine zu große Solladaptionszeit gewählt, ist der adaptive TOR-Algorithmus sehr sensitiv bezüglich Änderungen der Größen  $d$ ,  $v_{rel}$  sowie  $a_{zo}$  und es werden häufig Fehlwarnungen generiert. Dies ist nicht Sinn der Adaption und würde die Akzeptanz des ACC-Systems verschlechtern. Desweiteren würde, wie beschrieben, der eingestellte Zeitpunkt überhaupt nur in wenigen Fällen erreicht, da in der Mehrzahl der TOR auslösenden Situationen keine derart frühzeitige Prädiktion möglich ist. Es lässt sich grob zusammenfassen, dass eine Adaptionszeit von größer 1,5s nicht sinnvoll umgesetzt werden kann.

Wird eine sehr kleine Adaptionszeit gewählt, so ist der daraus resultierende Sicherheitsgewinn gering. Das System büßt zwar keine Zuverlässigkeit aufgrund erhöhter Fehlwarnungen ein, das Plus an Reaktionszeit für den abgelenkten Fahrer fällt aber eventuell zu gering aus. Eine Solladaptionszeit von  $\Delta t < 0,25s$  erscheint deshalb wenig sinnvoll.

## 7.1.2 Bewertung der Funktionalität

Zur Beurteilung der Funktionalität des fahreraufmerksamkeitsadaptierten TOR-Algorithmus wurde eine Probandenstudie durchgeführt. Ziel dabei war es, das System sowohl anhand von objektiven als auch von subjektiven Gesichtspunkten zu bewerten. Dies erfolgte zum einen durch Messung der Reaktionszeiten der Probanden und zum anderen durch eine Befragung der Versuchspersonen.

Im Vorfeld der Versuchsreihe war es notwendig, entsprechende Testszenarien zu spezifizieren. Im Zuge dessen wurden verschiedene Situationen ausgewählt, die bei der Fahrt mit einem ACC-System auftreten können. Die Auswahl der Konstellationen wurde dahingehend getroffen, möglichst jedes Auslösekriterium des TOR-Algorithmus in mindestens einem Testszenario untersuchen zu können. Anhand der Testszenarien wurde es außerdem möglich, Simulationen hinsichtlich der Adaptionzeitpunkte der Übernahmeaufforderung durchzuführen. Die Testszenarien wurden dabei wie folgt definiert:

- Szenario 1** Knappes Einscheren eines anderen Verkehrsteilnehmers in die eigene Spur.  
Dieses Szenario spricht hauptsächlich das Kriterium des absoluten Abstandes an.
- Szenario 2** Auffahren auf ein deutlich langsamer vorausfahrendes Fahrzeug mit großer Überschussgeschwindigkeit.  
Dieses Szenario zielt im Wesentlichen auf das Kriterium des relativen Abstandes ab. Es kann jedoch auch, je nach konkreter Situation, eine Auslösung des Kriteriums der absoluten Beschleunigung verursachen.
- Szenario 3** Unvermitteltes Bremsmanöver eines vorausfahrenden Fahrzeugs.  
Dieses Szenario dient vordergründig der Untersuchung des Kriteriums der absoluten Beschleunigung. Es kann jedoch auch in einer entsprechenden Situation das Kriterium des relativen Abstandes verletzen.

Diese drei Szenarien sprechen somit jeweils ein anderes Auslösekriterium des TOR-Algorithmus an und stellen darüberhinaus unterschiedliche Anforderungen an die Reaktion der Probanden innerhalb der Studie.

Die verschiedenen Aspekte der Probandenreaktion auf die Adaption des Warnzeitpunktes wurden durch Hypothesen fixiert und mittels eines geeigneten Versuchsablaufes messtechnisch und durch

Probandenbefragung geprüft. Im Folgenden werden diese Hypothesen genannt, die entsprechende Beweisabsicht und die Bedeutung einer Ablehnung der Annahme erläutert.

**Hypothese 1** *„Bei Ablenkung benötigt ein Fahrer mehr Zeit, um eine Gefahrensituation zu erkennen und auf diese zu reagieren.“*

Diese Annahme dient der Bestätigung, dass eine Adaption grundsätzlich sinnvoll ist. Würde kein Unterschied zwischen den Reaktionszeiten mit und ohne Ablenkung des Fahrers bestehen, so könnte durch die Adaption kein zusätzlicher Nutzen erzielt werden.

Wird die Hypothese abgelehnt, so bedeutet dies, dass ein abgelenkter Fahrer ebenso schnell auf eine Gefahrensituation reagieren kann wie ein aufmerksamer Fahrer. Die Adaption wäre unnötig.

**Hypothese 2** *„Durch das Vorziehen einer Warnung bei Unaufmerksamkeit des Fahrers wird es dem Fahrer ermöglicht, früher auf eine Gefahrensituation zu reagieren.“*

Durch diese Annahme kann bestätigt werden, dass die Adaption des Warnzeitpunktes das Verhalten des Fahrers in Gefahrensituationen positiv beeinflusst. Der zeitlich vorgezogene Warnzeitpunkt hilft einem abgelenkten Fahrer dabei, früher auf eine Gefahrensituation zu reagieren.

Wird die Hypothese abgelehnt, so bedeutet dies, dass das Vorziehen einer Warnung keinen Effekt auf den Reaktionszeitpunkt des Fahrers hat. Die Adaption wäre wirkungslos.

**Hypothese 3** *„Der Fahrer wird bei der Frage nach einem Vergleich der beiden Systeme, keinen von ihm bemerkten Unterschied nennen können.“*

Diese Annahme dient der Bestätigung, dass die Adaption des Warnzeitpunktes vom Fahrer unbemerkt bleibt. Dies unterstützt zu zeigen, dass die Adaption keine Verschlechterung der Akzeptanz des Systems bedingt.

Wird die Hypothese abgelehnt, so bedeutet dies, dass der Fahrer die Änderung des Zeitpunktes bemerkt. Dies bedeutet nicht zwingend, dass die Akzeptanz des Systems sinkt. Es muss jedoch gefolgert werden, dass sich die Akzeptanz des Systems gegenüber einem System ohne Adaption verändert hat.

### 7.1.2.1 Aufbau der Versuchsreihe

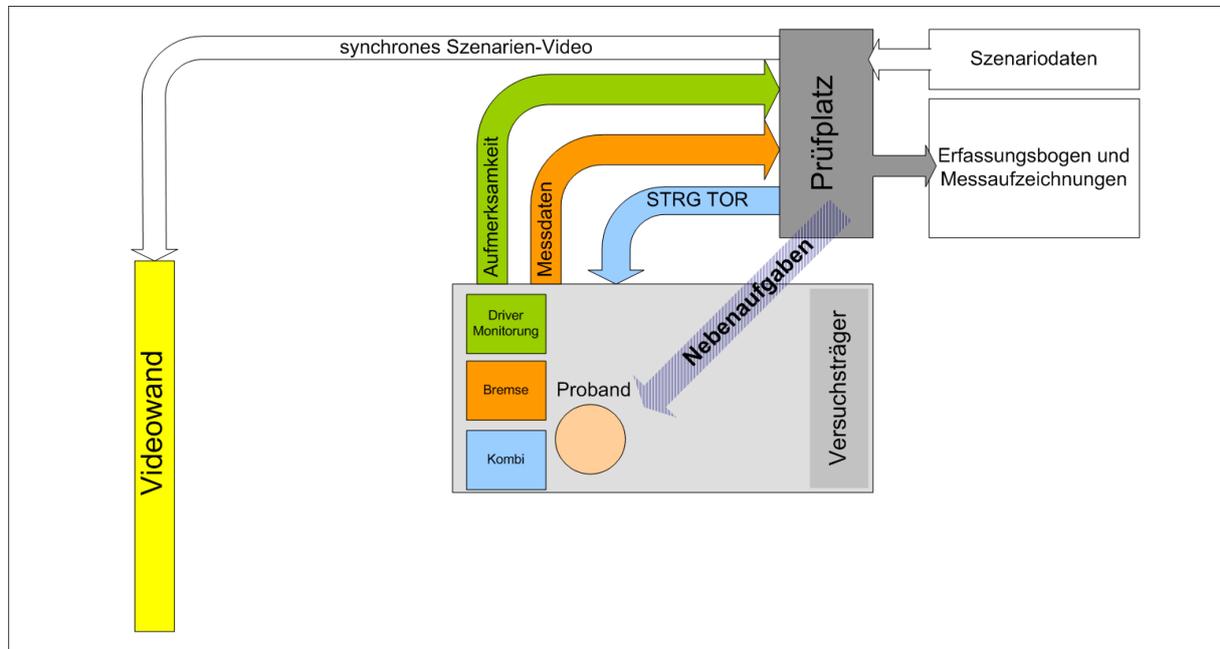
Zur Überprüfung der Hypothesen wurde eine nicht reaktive Fahrumgebung gewählt. Die zum Teil kritischen Testszenarien wurden im Vorfeld der Probandenstudie unter Verwendung des in Abschnitt 3.3.3 beschriebenen Versuchsfahrzeugs kontrolliert eingefahren. Dabei wurde ein Video des vorausfahrenden Verkehrs aus der Fahrerperspektive sowie zeitsynchron dazu der Datenstrom aller relevanten Fahrzeugbussysteme aufgezeichnet. Aus den Aufzeichnungen wurde anschließend ein 20 Minuten langes Gesamttestszenario, bestehend aus einem Videodatenstrom und einem zeitlich dazu synchronen Fahrzeugparameterdatenstrom für die Ansteuerung des ACC-Systems, zusammengestellt. Dieses Gesamtszenario enthielt 18 Situationen, bei denen es zu einem Auslösen einer Übernahmeaufforderung kam und beinhaltete alle eingangs genannten Teilszenarien in gleichem Umfang. Die Probandenstudie fand dann anschließend ebenfalls unter Verwendung des Versuchsfahrzeugs (vgl. Abschnitt 3.3.3) im Stand statt. Der adaptive TOR-Algorithmus (vgl. Abbildung 7.1) wurde dafür im Versuchsträger implementiert und die zeitlich angepassten TOR-Warnungen waren auf Basis einer externen Ansteuerung des ACC-Systems realitätsnah darstellbar. Der Versuchsträger stellt somit als Fahrzeug eine realitätsgetreue „Arbeitsumgebung“ für die Versuche zur Verfügung. So können beispielsweise typische Nebenaufgaben an den Probanden gestellt werden, die in ähnlicher Form auch in realen Fahrsituationen vorkommen. Um keine weitere Ablenkung durch die Arbeit des Versuchsleiters zu erzeugen, wurde dessen Arbeitsplatz außerhalb des Fahrzeuges vorgesehen. Von hier aus wurde die komplette Steuerung des Versuchsablaufes vorgenommen und die Messdaten aufgezeichnet. Der Versuchsaufbau ist in der folgenden Abbildung 7.3 grafisch dargestellt.

Vom Prüfplatz aus wurden die vorher aufgezeichneten Szenariendaten mit Hilfe eines Projektors als Video vor dem Probanden dargestellt. Die Szenariendaten dienten auch als Grundlage zur synchronen Ansteuerung der Fahrzeugreaktionen, insbesondere der des ACC-Systems. Die Daten bezüglich Fahreraufmerksamkeit und Bremsverhalten des Probanden wurden am Testplatz aufgezeichnet.

Um bei den Probanden gezielt visuelle Ablenkung von der primären Fahraufgabe hervorzurufen, wurden diese aufgefordert, verschiedene tertiäre Fahraufgaben (vgl. Tabelle 2.1) auszuführen. Diese künstliche Ablenkung sollte der Ablenkung bei normalen Fahrten, nicht unter Versuchsbedingungen, möglichst nahe kommen. Bei dem gewählten Testmodus war der Fahrer auf Grund des fehlenden Gefahrenbezugs dazu verleitet, sich stärker als im realen Fall auf die Nebenaufgabe zu konzentrieren. Dem wurde versucht durch gezielte Anweisungen durch den Versuchsleiter entgegenzuwirken.

Die Reihenfolge der zu testenden Systeme (ACC mit fahreraufmerksamkeitsadaptivem TOR vs. Standard ACC) spielt in der hier beschriebenen Konstellation ebenfalls eine wichtige Rolle. Die

Ergebnisse eines Tests, in welchem die Reihenfolge der zu bewertenden Systeme nicht verändert wurde, können nur auf diese Testkonstellation bezogen werden. In solchen Fällen können Ergebnisse auftreten, welche durch die Testkonstellation bedingt sind. Um diesen Effekt zu vermeiden, werden die verschiedenen Systemausprägungen in ihrer Reihenfolge permutiert.



**Abbildung 7.3: Versuchsaufbau zur Evaluierung des fahreraufmerksamkeitsadaptiven TOR-Algorithmus (Trefflich, 2008b)**

Ein Vorteil der hier beschriebenen Vorgehensweise ist, dass die aufgezeichneten kritischen Szenarien für alle Probanden identisch wiederholbar sind und dadurch eine hohe Vergleichbarkeit der erhobenen Daten ermöglicht wird. Außerdem kann so eine große Vielfalt an verschiedenen TOR-Szenarien in kurzer Folge dem Probanden präsentiert und seine Reaktionen und Einschätzungen erhoben werden.

Der größte Nachteil dieses Testmodus besteht darin, dass die Übertragbarkeit des Probandenverhaltens auf den realen Straßenverkehr aufgrund der Einfachheit der Nachbildung der Fahrsituation nur mit Einschränkungen möglich ist. Der Proband kann sich nur durch das Videobild in die Verkehrssituation hineinversetzen. Außerdem wird die Realitätsnähe dadurch gemindert, dass verschiedene Szenariensequenzen sich wiederholen und unvermittelt ineinander übergehen.

Es ist aber davon auszugehen, dass die in diesem nicht reaktiven Simulationsaufbau erlangten Erkenntnisse Tendenzen aufzeigen, die auch auf den Realverkehr übertragbar sind. Im Folgenden wird nun der Versuchsablauf näher erläutert.

### 7.1.2.2 Versuchsdurchführung

Zu Beginn des Versuchs fand die Einweisung des Probanden in die verwendeten Systeme statt. Dies war notwendig, um sicherzustellen, dass alle Testpersonen durch die gegebenen Nebenaufgaben in vergleichbarem Maße abgelenkt wurden. Es wurde bewusst darauf verzichtet, dem Probanden detaillierte Informationen hinsichtlich des verwendeten neuen Systems zu geben.

Nachdem der Proband eine Position im Versuchsträger eingenommen hatte, welche seiner gewöhnlichen Fahrhaltung entsprach, konnte mit der Simulation der Fahrt begonnen werden.

Zu diesem Zweck wurde das zusammengestellte Gesamttestszenario in Form eines Video- und Fahrzeugdatenverkehrsplayback abgespielt. Die genaue Abfolge der einzelnen TOR-Situationen kann der folgenden Tabelle 7.1 entnommen werden.

| Testsequenz- Nr. | Szenariotyp  | TOR        | Hypothese | Ablenkung        |
|------------------|--------------|------------|-----------|------------------|
| 1                | Einscherer   | keiner     | H1        | keine            |
| 2                | Bremmung     | keiner     | H1        | keine            |
| 3                | Überschuss-V | standard   | H2        | Klimabedienung   |
| 4                | Bremmung     | standard   | H2        | Klimabedienung   |
| 5                | Einscherer   | keiner     | H1        | keine            |
| 1                | Einscherer   | keiner     | H1        | Radio einstellen |
| 6                | Abstand      | standard   | H3        | keine            |
| 6                | Abstand      | vorgezogen | H3        | keine            |
| 7                | Überschuss-V | standard   | H2        | Radio einstellen |
| 3                | Überschuss-V | vorgezogen | H2        | Radio einstellen |
| 8                | Überschuss-V | standard   | H3        | keine            |
| 8                | Überschuss-V | vorgezogen | H3        | keine            |
| 2                | Bremmung     | keiner     | H1        | Navigation       |
| 5                | Einscherer   | keiner     | H1        | Navigation       |
| 4                | Bremmung     | vorgezogen | H2        | Navigation       |
| 7                | Überschuss-V | vorgezogen | H2        | Navigation       |
| 9                | Bremmung     | standard   | H3        | keine            |
| 9                | Bremmung     | vorgezogen | H3        | keine            |

**Tabelle 7.1: Darstellung des Versuchsablaufs; Szenarien mit gleicher Nummer dienen im direkten Vergleich dem Beweis der angegebenen Hypothesen (Trefflich, 2008b)**

Zum Bestätigen aller 3 Hypothesen wurden je Annahme 3 Szenarien ausgewählt. Jedes dieser Szenarien wurde dem Probanden im Laufe des Versuchs zwei Mal unter geänderten Rahmenbedingungen präsentiert. Anhand der geänderten Bedingungen, bei sonst gleich bleibendem Umwelteinfluss, kann aus dem veränderten Verhalten des Probanden Information gewonnen werden.

So wird z.B. zwei Mal eine identische kritische Situation gezeigt, bei der ein vorausfahrendes Fahrzeug unvermittelt bremst. Beim ersten Mal ist der Fahrer aufmerksam, beim zweiten Mal durch eine Nebenaufgabe abgelenkt. Gemäß der ersten Hypothese ist zu erwarten, dass dieser im zuletzt genannten Fall später auf die kritische Situation reagiert.

Im Weiteren wird nun erläutert, wie die einzelnen Hypothesen auf ihr Zutreffen hin untersucht wurden.

Zum Bestätigen von **Hypothese 1** war es erforderlich, dass in dem jeweiligen Teilszenario keine Übernahmeaufforderung erfolgte, da die unbeeinflusste Reaktion des Probanden gemessen werden sollte. Des Weiteren waren Szenarien zu wählen, welche es dem Fahrer nur schwer erlaubten, die jeweilige kritische Situation zu antizipieren. Aus diesem Grund wurden hierfür unvermittelte Einscherer und plötzliche Bremsungen des vorausfahrenden Fahrzeugs gewählt.

Der zeitliche Abstand zwischen den Vergleichsszenarien wurde dabei möglichst groß gewählt, um den Lerneffekt soweit als möglich einzuschränken.

Für **Hypothese 2** musste der Zeitpunkt der Übernahmeaufforderung zwischen den zusammengehörigen Vergleichsfahrten verändert werden. Dies war erforderlich um zu zeigen, dass die zeitliche Variation des Warnzeitpunktes den Bremszeitpunkt des Probanden beeinflusst. Der Proband war hier gemäß Hypothese 2 stets mit einer Nebenaufgabe beschäftigt. Die Unaufmerksamkeit wurde in diesem Fall automatisch auf Basis des Algorithmus mit dynamisch nachgeführter ROI detektiert (vgl. Abbildung 6.5), der Auslösezeitpunkt der Übernahmeaufforderung aber nur bei einem Durchlauf der Vergleichsszenarien entsprechend automatisiert vorgezogen (vgl. Abbildung 7.1).

Auch bei diesem Testteil wurde der zeitliche Abstand zwischen den einzelnen Szenarien möglichst groß gewählt, um ein Wiedererkennen möglichst zu vermeiden.

**Hypothese 3** sollte dadurch bestätigt werden, dass dem Probanden direkt aufeinander folgend zweimal eine identische kritische Situation gezeigt wurde. Dies steigert enorm den Effekt der Wiedererkennung. Zwischen den beiden Situationen wurde der Zeitpunkt der Übernahmewarnung variiert. Anschließend wurde der Proband dahingehend befragt, ob er einen Unterschied zwischen den beiden gesehenen Szenarien nennen könne. Anhand der jeweiligen Antwort konnte auf die Hypothese geschlossen werden.

### 7.1.2.3 Ergebnisse und Diskussion

Zu **Hypothese 1** konnten 34 Messungen ausgewertet werden. Diese wurden dahingehend beurteilt, ob sie die Hypothese unterstützen oder gegen diese sprechen. Sie unterstützen die Hypothese dann, wenn der Fahrer bei Ablenkung später auf eine Gefahrensituation reagiert hat als bei Aufmerksamkeit. War der Zeitpunkt der Bremsauslösung identisch oder früher, so wurde das Ergebnis negativ interpretiert.

Anhand dieser einfachen Bewertung lassen sich folgende Ergebnisse ableiten:

59% der Messungen bestätigen ein positives, 41% ein negatives Ergebnis.

Die zeitlichen Angaben im Folgenden bezeichnen die Differenz zwischen den Bremszeitpunkten bei abgelenkter und nicht abgelenkter Fahrt. Die positiven Ergebnisse weisen hierbei auf eine, gegenüber dem Standard TOR vorgezogene, die negativen auf eine gegenüber dem Standard TOR verzögerte, Reaktion hin.

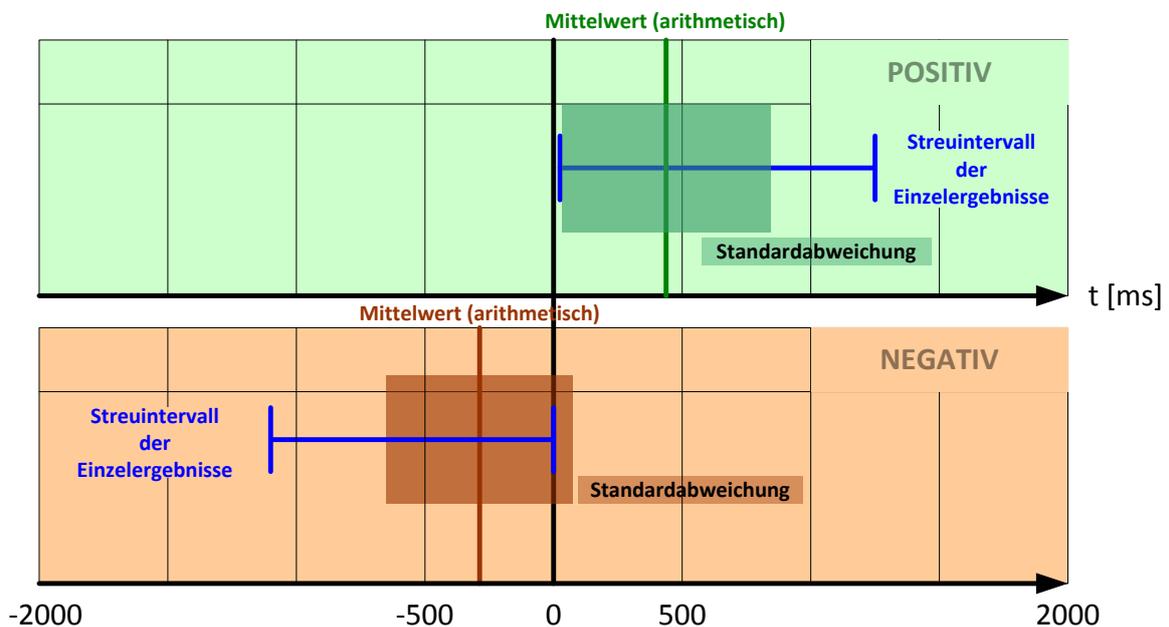


Abbildung 7.4: Darstellung der Verteilung der Ergebnisse zu Hypothese 1 (Trefflich, 2008b)

Bei den positiven Ergebnissen streuten die Bremszeitpunkte durchschnittlich um 410ms um den Mittelwert von 440ms. Sie bewegten sich dabei zwischen den Maxima von 10ms und 1,5s.

Bei den negativen Ergebnissen streuten die Bremszeitpunkte durchschnittlich um 360ms um den Mittelwert von 290ms. Sie bewegten sich dabei zwischen den Maxima von 0ms und 1,27s.

Der erste Versuchsteil sollte im Rahmen von **Hypothese 1** zeigen, dass ein abgelenkter Fahrer nicht in der Lage ist, ebenso schnell auf eine kritische Situation zu reagieren wie ein aufmerksamer Fahrer. Die hierbei gewonnenen Ergebnisse spiegeln dies jedoch nicht wieder. Dies widerspricht einer Vielzahl von bereits zu diesem Thema in größerem Umfang durchgeführten Studien z.B. (NHTSA, 2006), welche im Gegensatz dazu die in Hypothese 1 gemachte Aussage bekräftigen.

Die gegensätzlichen Ergebnisse lassen sich darauf zurückführen, dass der Versuchsaufbau nicht dazu in der Lage war, den Probanden in die Verkehrssituation hineinzusetzen. Der Beweis von Hypothese 1 erfolgte z.B. durch die Verkehrssituation „plötzliches Einscheren eines anderen Fahrzeugs in die eigene Spur“ (vgl. Tabelle 7.1). Diese Situation wurde unverändert zwei Mal während der Studie gezeigt und die Reaktionszeitpunkte auf die kritische Situation wurden miteinander verglichen. Beim zweiten Abspielen der Situation wurde der Proband durch eine Nebenaufgabe abgelenkt. Hierbei kannte er die Situation also bereits und hatte so die Möglichkeit, früher als zuvor zu reagieren. Es wurde angenommen, dass trotz des eingetretenen Lerneffekts aufgrund der Ablenkung ein späterer Bremszeitpunkt gemessen werden kann. Es kann nun gefolgert werden, dass entweder der Lerneffekt unterschätzt oder aber die Ablenkung überschätzt wurde. Die Ablenkung wurde bei Fahrt in dieser Simulation durch viele Probanden als weit unkritischer empfunden, da sie sich in keiner nachvollziehbaren Gefahrensituation sahen.

Zu **Hypothese 2** konnten 37 Messungen ausgewertet werden. Diese wurden dahingehend bewertet, ob sie die Hypothese unterstützen oder gegen diese sprechen. Sie unterstützen die Hypothese dann, wenn der Bremszeitpunkt des Fahrers bei vorgezogener Warnung früher stattgefunden hat. War der Zeitpunkt der Bremsauslösung identisch oder später, so wurde das Ergebnis negativ interpretiert.

Anhand dieser einfachen Bewertung lassen sich folgende Ergebnisse ableiten:

81% der Messungen bestätigen ein positives, 19% ein negatives Ergebnis.

Die nachfolgenden zeitlichen Angaben bezeichnen die Differenz zwischen den Bremszeitpunkten bei abgelenkter und nicht abgelenkter Fahrt. Die positiven Ergebnisse weisen hierbei auf eine, gegenüber dem Standard TOR vorgezogene, die negativen auf eine gegenüber dem Standard TOR verzögerte, Reaktion hin.

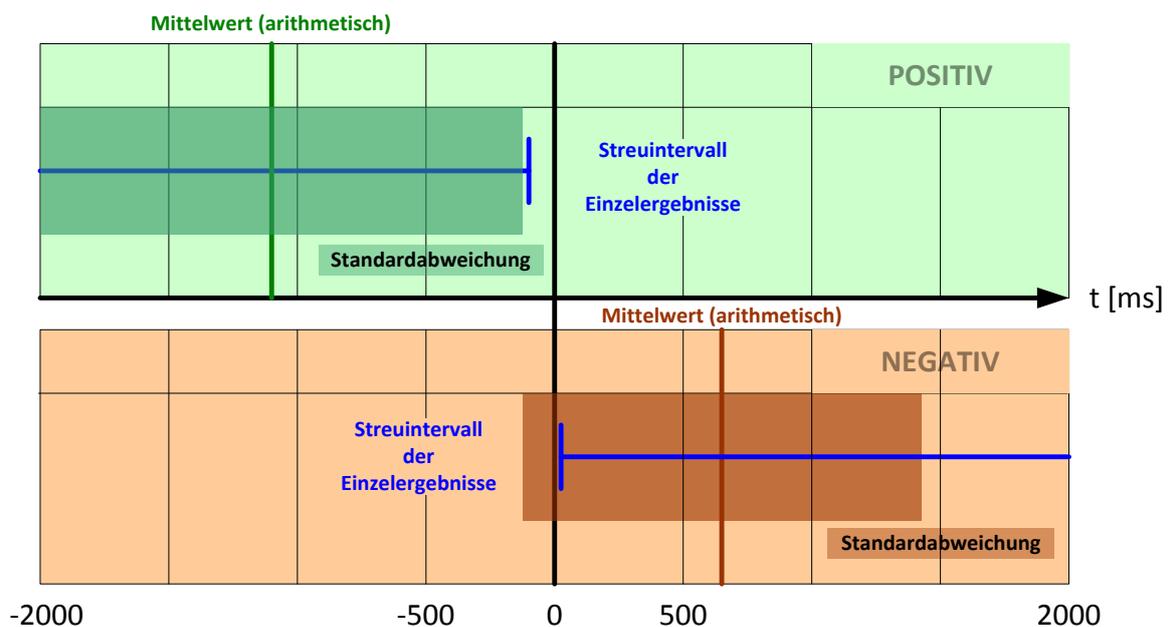


Abbildung 7.5: Darstellung der Verteilung der Ergebnisse zu Hypothese 2 (Trefflich, 2008b)

Bei den positiven Ergebnissen streuten die Bremszeitpunkte durchschnittlich um 1080ms um den Mittelwert von 1100ms. Sie bewegten sich dabei zwischen den Maxima von 80ms und 2490ms.

Bei den negativen Ergebnissen streuten die Bremszeitpunkte durchschnittlich um 790ms um den Mittelwert von 660ms. Sie bewegten sich dabei zwischen den Maxima von 20ms und 2020ms.

**Hypothese 2** sollte belegen, dass das Vorziehen des Warnzeitpunktes dem Fahrer ermöglicht, früher auf eine Gefahrensituation zu reagieren. Diese Hypothese kann mit einer Unsicherheit von 20% akzeptiert werden. In Anbetracht des einfachen Versuchsaufbaus scheint das Ergebnis überraschend gut. Folgendes ist jedoch kritisch anzumerken: Die Probanden wurde jeweils unter Beschäftigung mit einer Nebenaufgabe einer kritischen Situation ausgesetzt. Diese Situation wurde zwei Mal wiederholt. Beim zweiten Abspielen der Situation wurde die adaptierte Übernahmewarnung ausgegeben. Die frühere Reaktion der Probanden könnte also auch auf Lerneffekte zurückgeführt werden, welche sich nicht ausschließen lassen. Ebenfalls gegen eine positive Interpretation spricht auch die geringe Stichprobengröße, welche ein starkes Schwanken denkbar macht.

Zu **Hypothese 3** konnten 22 Messungen ausgewertet werden. Diese wurden dahingehend bewertet, ob sie die Hypothese unterstützen oder gegen diese sprechen. Sie unterstützen die Hypothese dann,

wenn der Fahrer keinen Unterschied zwischen den beiden Systemen bemerkt. Wurde die Verschiebung des Warnzeitpunktes richtig erkannt, so wurde das Ergebnis negativ bewertet.

Anhand dieser einfachen Bewertung lassen sich folgende Ergebnisse ableiten:

82% der Messungen bestätigen ein positives, 18% ein negatives Ergebnis.

Die **dritte Hypothese** sollte belegen, dass die Anpassung des Warnzeitpunktes durch die Probanden nicht bemerkt werden kann. Dies ist notwendig, um Bedenken bezüglich verminderter Akzeptanz des Systems auszuräumen. Diese Annahme kann mit einer Unsicherheit von 20% akzeptiert werden. Auch hier kann das Gegenargument der sehr geringen Stichprobengröße sowie des relativ synthetischen Versuchsaufbaus entgegengebracht werden.

## 7.2 Fahreraufmerksamkeitsadaptives Warnkonzept eines LDW-Systems

Neben der im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Adaption eines ACC-Systems wurde, ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit, ein Algorithmus entwickelt, der es ermöglicht, die Warnstrategien eines LDW-Systems in Abhängigkeit von der detektierten Fahreraufmerksamkeit anzupassen. Die Funktionsweise eines Spurverlassenswarners ohne fahreraufmerksamkeitsadaptive Warnstrategien, im Folgenden kurz Standard LDW genannt, ist in Abschnitt 3.1.2 beschrieben. Darauf aufbauend wurde unter Verwendung des Fahreraufmerksamkeitsdetektionsalgorithmus mit dynamisch nachgeführter ROI (vgl. Abschnitt 6.2) eine aufmerksamkeitsadaptive Auslegung eines LDW-Systems konzipiert.

Ein Standard LDW-System warnt den Fahrer vor unbeabsichtigtem Verlassen der Fahrspur durch eine Vibration des Lenkrades. Die Absicht des Fahrers wird dabei alleine aus der Betätigung des Blinkers abgeleitet. Wird der Blinker z.B. links gesetzt und anschließend die linke Spurmarkierung überfahren, erfolgt keine Warnung. Die Absichtserkennung nur auf der Grundlage einer Blinkerbetätigung bietet Verbesserungspotential, da mit dieser Systemauslegung häufig LDW-Warnungen ausgelöst werden, die von vielen Fahrern als unnötig empfunden werden. Sinnvoll kann es nun sein, nur noch in den Situationen zu warnen, in denen der Fahrer aufgrund von visueller Ablenkung die Fahrspur zu verlassen droht (vgl. auch Pohl (2007)) oder das Fahrzeug sich durch eine zu hohe Kurvengeschwindigkeit der kurvenäußeren Spurmarkierung nähert. Wie in Kapitel 2.7 diskutiert und in Abbildung 2.6 dargestellt, besteht ein direkter Zusammenhang zwischen visueller Ablenkung des Fahrers und der Spurhaltung (siehe dazu auch Kapitel 8).

Auf Basis einer visuellen Aufmerksamkeitsdetektion bietet sich nun die Möglichkeit, eine fahreraufmerksamkeitsgesteuerte LDW-Warnstrategie zu entwickeln und dabei die Anzahl der Warnungen gegenüber einem Standard LDW zu reduzieren. Ein Entfallen von LDW-Warnungen in nicht kritischen Situationen würde dabei die Akzeptanz des Systems steigern.

Ein weiterer Ansatzpunkt für ein fahreraufmerksamkeitsadaptives Warnkonzept stellt die Möglichkeit dar, im Falle eines unaufmerksamen Fahrers den Warnzeitpunkt für das Auslösen einer Lenkrad-vibration zeitlich vorzuziehen. Dies würde in kritischen Situationen von Fahrerablenkung dem Fahrer mehr Zeit für eine adäquate Reaktion einräumen und somit die Fahrsicherheit erhöhen.

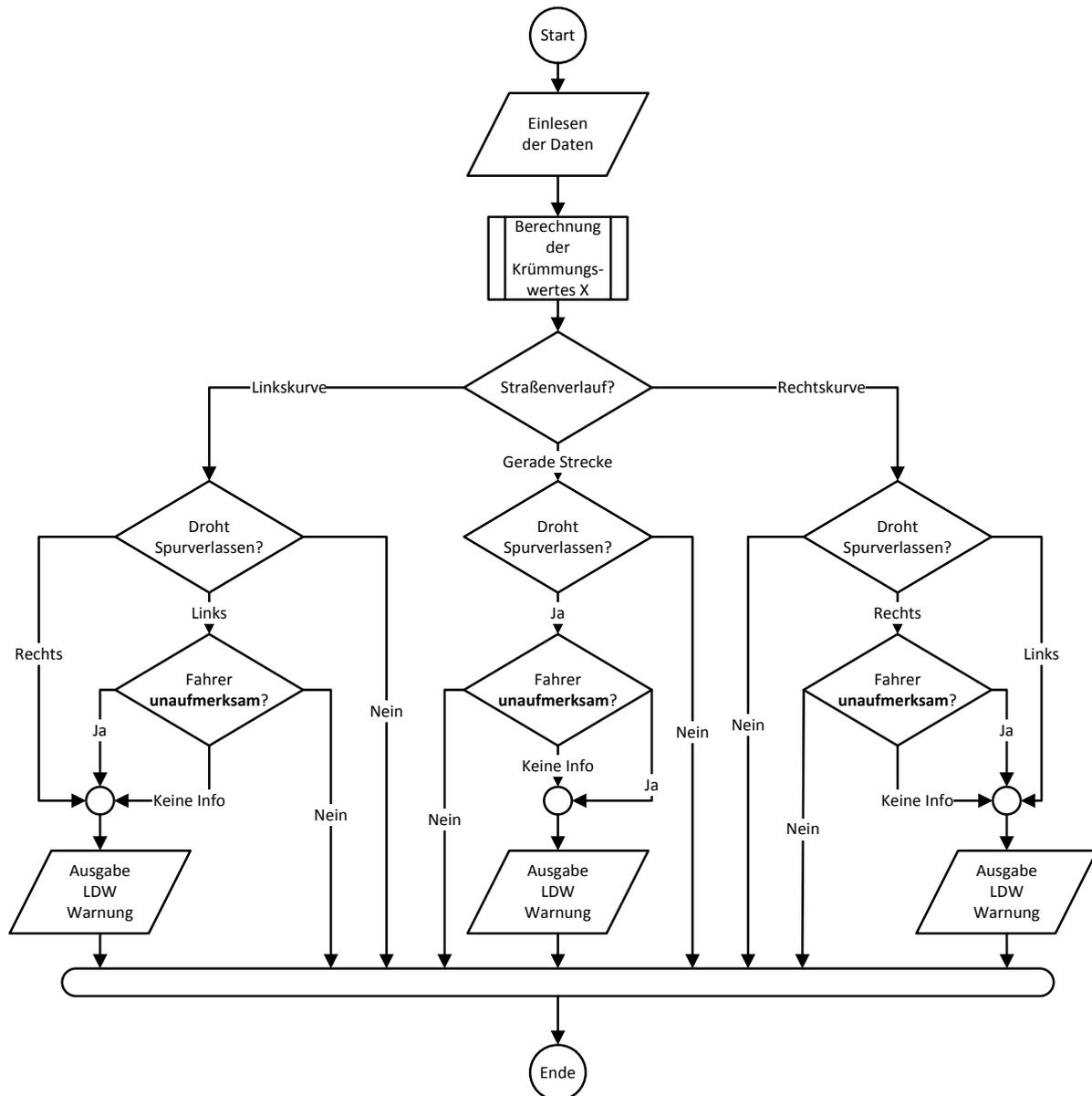
## 7.2.1 Funktionsweise

### Adaptionsvariante 1

Um eine Reduktion von LDW-Warnungen gegenüber dem Standard LDW in Situationen detektierter Fahreraufmerksamkeit zu erreichen, wurde der in Abbildung 7.6 dargestellte Adaptionsalgorithmus entwickelt. Bei dieser Auslegung wird in Abhängigkeit des vom LDW-System detektierten weiteren Straßenverlaufs sowie anhand des mit Hilfe der dynamisch nachgeführten Aufmerksamkeitsregion (vgl. Abbildung 6.5) bestimmten Fahreraufmerksamkeitszustandes die LDW-Warnstrategie adaptiert. Zur Einschätzung des weiteren Straßenverlaufs wird die vom LDW-System ermittelte Fahrspurkrümmung herangezogen und dahingehend interpretiert, ob eine Links- oder Rechtskurve bzw. ein gerader Streckenabschnitt vorausliegt. Zur Richtungsbestimmung wird dabei jeweils eine Hysterese-funktion verwendet, da der Krümmungswert  $X$  der Fahrstrecke sehr unzuverlässig vom verwendeten LDW-System ermittelt wird. Die Entscheidungsschwellen der jeweiligen Hysterese-funktion sind in der folgenden Tabelle 7.2 zusammengefasst.

| Klassifikation | Linkskurve   | Gerader Streckenabschnitt         | Rechtskurve  |
|----------------|--------------|-----------------------------------|--------------|
| <b>Ja</b>      | $X > +0,003$ | $+0,001 > X > -0,001$             | $X < -0,003$ |
| <b>Nein</b>    | $X < +0,001$ | $+0,001 < X$ oder<br>$-0,001 > X$ | $X > -0,001$ |

Tabelle 7.2: Hystereseschwellwerte für Links- oder Rechtskurve bzw. geraden Streckenabschnitt



**Abbildung 7.6: Funktionsweise der LDW-Adaptionvariante 1;  
Reduzieren der Warnungen bei „aufmerksamem“ Fahrer**

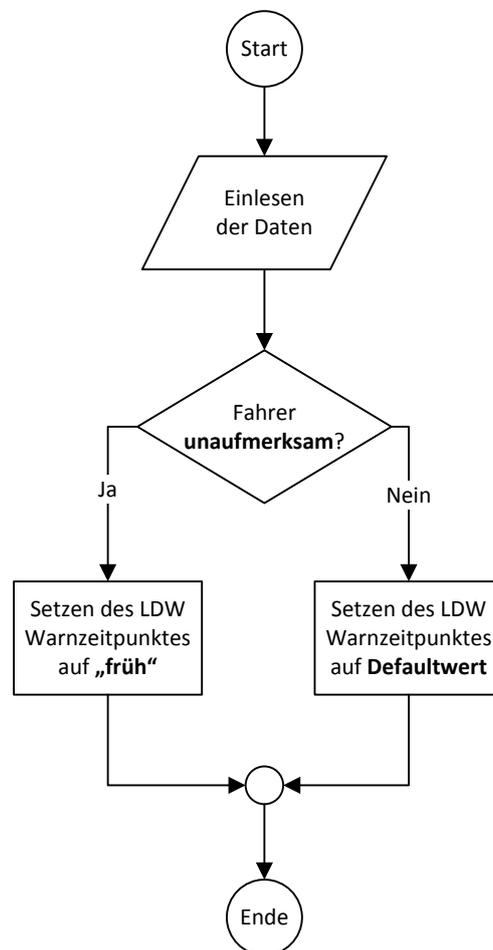
An dieser Stelle soll kurz die Funktionsweise am Beispiel einer Linkskurve erläutert werden. Gleiches gilt analog für den Fall einer Rechtskurve.

Bei einer Linkskurve erfolgt eine LDW-Warnung nur, wenn dabei die rechte Fahrbahnmarkierung überschritten, das Fahrzeug aus der Kurve getragen oder der Fahrer als „unaufmerksam“ erkannt wird oder keine Aufmerksamkeitsklassifikation vorliegt. Keine Warnung erfolgt bei Überschreitung der kurveninneren linken Fahrbahnmarkierung und einem dabei als „aufmerksam“ klassifizierten Fahrer.

In einem geraden Streckenabschnitt erfolgt eine LDW-Warnung, wenn der Fahrer dabei als „unaufmerksam“ eingestuft wird oder keine Aufmerksamkeitsklassifikation vorliegt. Keine Warnung erfolgt in dieser Situation hingegen bei einem als „aufmerksam“ erkannten Fahrer.

### Adaptionsvariante 2

Das Standard LDW bietet außerdem dem Fahrer die Möglichkeit, den Zeitpunkt, zu dem bei Verlassen der Fahrspur eine Warnung ausgelöst wird, durch eine Einstellung im MMI Menü manuell zu verändern. Darauf aufbauend wurde eine zweite LDW-Adaptionsmöglichkeit, ebenfalls unter Verwendung der Fahreraufmerksamkeitsdetektion, basierend auf einer dynamisch nachgeführten ROI (vgl. Abbildung 6.5), entwickelt. Deren Funktionsweise ist in der folgenden Abbildung 7.7 dargestellt.



**Abbildung 7.7: Funktionsweise der LDW-Adaptionsvariante 2;  
Veränderung des Warnzeitpunktes bei „unaufmerksamem“ Fahrer**

Bei dieser Auslegung wird der Warnzeitpunkt des LDW automatisch in Abhängigkeit vom detektierten Aufmerksamkeitszustand des Fahrers parametrieret. Wird der Fahrer als

„unaufmerksam“ eingestuft, wird der Warnzeitpunkt auf „früh“ gesetzt. Somit erfolgt eine Warnung konstant bei 1s vor Überfahren einer seitlichen Spurmarkierung. Im Zustand „aufmerksam“ wird hingegen der zuvor vom Fahrer manuell eingestellte Warnzeitpunkt unverändert beibehalten bzw. wieder hergestellt. War der manuell gewählte Warnzeitpunkt zuvor auf „spät“ oder „adaptiv“ gesetzt, wird hierbei durch ein automatisches unaufmerksamkeitsbedingtes Setzen auf „früh“ ein deutliches Vorziehen der LDW-Warnung erreicht und dem Fahrer somit mehr Zeit zum reagieren eingeräumt.

### 7.2.2 Bewertung der Funktionalität

Um den Aspekt der Akzeptanzsteigerung bei einem warnenden FAS (vgl. Abschnitt 3.1) durch ein fahreraufmerksamkeitsadaptives Warnkonzept am Beispiel eines LDW-Systems genauer zu evaluieren, wurde eine Probandenstudie im Realverkehr durchgeführt. Zur Beurteilung wurden dabei sowohl objektiv messbare Parameter, wie die Anzahl der erfolgten LDW-Warnungen, registriert als auch subjektive Eindrücke der Versuchspersonen in Form eines Fragebogens erhoben.

Als Testszenario wurde eine Fahrt im realen Straßenverkehr, bestehend aus zwei Autobahnteilstrecken und einem kurvenreichen Landstraßenabschnitt, verwendet. Innerhalb der Versuchsreihe sollten die unterschiedlichen Warnkonzepte des Standard LDW (vgl. Abschnitt 3.1.2) und der LDW-Adaptionsvariante 1 (vgl. Abbildung 7.6) miteinander verglichen werden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird die LDW-Adaptionsvariante 1 im weiteren Verlauf dieser Arbeit kurz als DA LDW (engl. Driver Adaptive LDW) bezeichnet.

Das Ziel der Systemanpassung, „Steigerung der Akzeptanz“ wurde im Vorfeld der Studie in Form von zwei Hypothesen präzisiert:

**Hypothese 1** *„Ein Fahrer erhält bei einer Fahrt unter gleichbleibender Fahrweise mit dem DA LDW weniger oder höchstens genauso viele Warnungen wie bei derselben Fahrt mit dem Standard LDW“*

Es wird also angenommen, dass die Anzahl der Warnungen bei einem fahreraufmerksamkeitsadaptierten LDW, verglichen mit einem nicht adaptierten LDW, geringer bzw. gleich ausfällt. Eine Reduktion der Warnungen im Falle detektierter Aufmerksamkeit könnte sich dabei positiv auf die Nutzerakzeptanz auswirken. Zur Überprüfung dieser Hypothese wird die Anzahl der ausgegebenen Warnungen bei beiden Systemausprägungen messtechnisch erfasst und anschließend gegenübergestellt.

**Hypothese 2** *„Die Benutzerakzeptanz des LDW-Systems liegt bei Fahrten mit dem adaptierten Warnkonzept (DA LDW) höher oder ist mindestens gleichwertig im Vergleich zu Fahrten mit dem Standard LDW“*

Aufgrund der zu erwartenden Reduktion von LDW-Warnungen bei aufmerksamem Fahrer wird vermutet, dass ein so ausgelegtes LDW-System eine höhere oder zumindest gleich große Akzeptanz bei den Versuchspersonen hervorruft.

Zur Validierung dieser Hypothese auf der Grundlage einer subjektiven Beurteilung beider Systemausprägungen durch die Probanden wurde ein entsprechend strukturierter Fragebogen entwickelt.

### 7.2.2.1 Aufbau der Versuchsreihe

Wie bereits angedeutet, fand zur Überprüfung der Hypothesen eine Probandenstudie im öffentlichen Straßenverkehr statt. Die Gesamtfahrdauer betrug ca. 120 Minuten, dabei entfielen jeweils ca. 60 Minuten Fahrtzeit auf eines der beiden Systeme. Das Haupteinsatzszenario des Standard LDW-Systems stellt eine Autobahnfahrt dar. Aus diesem Grund enthielt die im Rahmen dieser Versuchsreihe zurückzulegende Teststrecke zum großen Teil diesen Straßentyp. Zusätzlich kommt die Fahreradaptation des DA LDW-Systems hauptsächlich auf kurvenreichen Landstraßenabschnitten zum tragen. Deshalb wurde die zu absolvierende Fahrtroute um eine Landstraßenfahrt mit entsprechend geeigneter Streckencharakteristik ergänzt. Die gesamte Teststrecke hatte eine Länge von 74km, dabei entfielen 13km auf den ersten und 16km auf den zweiten Autobahnabschnitt. Die Autobahnfahrten wurden von einem 8km langen Landstraßenabschnitt unterbrochen. Jeder Abschnitt wurde im Zuge der Studie von den Probanden zwei Mal, jeweils mit einer der beiden Systemausprägungen, befahren.

Um die Funktionalität beider Systemvarianten vergleichend betrachten zu können, wurden auf dem Messlaptop des in Abbildung 3.14 dargestellten Versuchsfahrzeuges der Algorithmus des Standard LDW und das Konzept des darauf aufbauenden Fahreradaptiven LDW (vgl. Abbildung 7.6) parallel implementiert. Durch den Versuchsleiter wurde für den jeweiligen Streckenabschnitt eine der beiden Systemausprägungen zur Ansteuerung der Lenkradvibration ausgewählt, die andere lief weiter im Hintergrund. Die Anzahl der produzierten Warnungen beider Systemvarianten wurde parallel erfasst und aufgezeichnet. Die subjektive Bewertung der Systeme durch die Probanden in den verschiedenen Streckenabschnitten wurde mit Hilfe eines Fragebogens protokolliert. Dieser Fragebogen war von jedem Probanden nach jedem absolvierten Teilabschnitt auszufüllen. Dabei standen die Aspekte

der Nachvollziehbarkeit und der Vorhersagbarkeit der verschiedenen Systemvarianten im Vordergrund.

Um bei den Probanden während der Testfahrt gezielt visuelle Ablenkung zu generieren und sie damit von der primären Fahraufgabe (vgl. Abschnitt 2.1) abzulenken, erfolgte in bestimmten Teilabschnitten eine Aufforderung durch den Versuchsleiter, eine Nebenaufgabe auszuführen. Bei diesen tertiären Fahraufgaben handelte es sich um die Eingabe von unterschiedlichen Zielorten in das Navigationssystem. Die Ziele wurden dabei vom Versuchsleiter willkürlich von einer vorgegebenen Liste ausgewählt und am Ende eines Teilabschnittes die Anzahl der abgeschlossenen Zieleingaben notiert.

Damit ein Einfluss der Abfolge, in der die beiden Systemausprägungen getestet werden, auf die Ergebnisse der Versuchsreihe ausgeschlossen werden kann, wurde während der Testfahrten sowohl die Einsatzreihenfolge der beiden LDW-Varianten, als auch der Streckenabschnitt mit zusätzlicher Ablenkung durch die Nebenaufgaben permutiert. Die Probandengruppe wurde dabei zu gleichen Teilen auf die verschiedenen Testkonstellationen aufgeteilt. Es ergeben sich die in der folgenden Tabelle 7.3 dargestellten Erprobungsvarianten.

| <b>Erprobungs-<br/>variante</b> | <b>Hinfahrt</b> | <b>Rückfahrt</b> | <b>Nebenaufgabe in<br/>Streckenabschnitt</b> |
|---------------------------------|-----------------|------------------|--|
| 1                               | LDW             | DA LDW           | 3  |
| 2                               | DA LDW          | LDW              | 3  |
| 3                               | LDW             | DA LDW           | 1  |
| 4                               | DA LDW          | LDW              | 1  |

**Tabelle 7.3: Entstehende Erprobungsvarianten durch Permutation der Randbedingungen**

Vorteil der hier beschriebenen Vorgehensweise, einer Evaluierung beider Systemkonzepte im realen Straßenverkehr, ist, dass die dabei erlangten Erkenntnisse anhand von Stichprobendaten gut auf die Grundgesamtheit übertragen werden können. Die unter Versuchsbedingungen ermittelten Messwerte und Einschätzungen sollten so gut das typische Fahrerverhalten widerspiegeln.

### 7.2.2.2 Versuchsdurchführung

Um eine Vergleichbarkeit des Kenntnisstandes zwischen den unterschiedlichen Probanden zu gewährleisten, wurde den Teilnehmern zu Beginn jeder Fahrt ein Informationsblatt ausgehändigt. In diesem Blatt werden die Versuchsstrecke, die Lenkradvibration, die zwei Systemauslegungen und das Ziel der Testfahrt erläutert. Dass es sich dabei um eine Evaluierung verschiedener LDW-Auslegungen handelt, wird nicht explizit erwähnt, um eine möglichst natürliche Reaktion der Probanden sicherzustellen. Zusätzlich wird der Fahrer gebeten, sich während der Testfahrt so natürlich wie möglich zu verhalten.

Abschließend erhielt der Fahrer den Hinweis, die Vorschriften der Straßenverkehrsordnung einzuhalten und auf die Benutzung jeglicher anderer Assistenz- und Infotainmentsysteme zu verzichten.

Damit alle Probanden einen vergleichbaren Stand hinsichtlich der Bedienung des Navigationssystems hatten, wurden sie ebenfalls vor Beginn der Messfahrt gebeten, fünf beliebige Ziele in das Navigationssystem einzugeben.

Die Anzahl der Probanden wurde auf 16 festgelegt, wobei acht die Messfahrt mit dem Standard LDW und die anderen acht mit dem Fahreradaptiven LDW beginnen sollten.

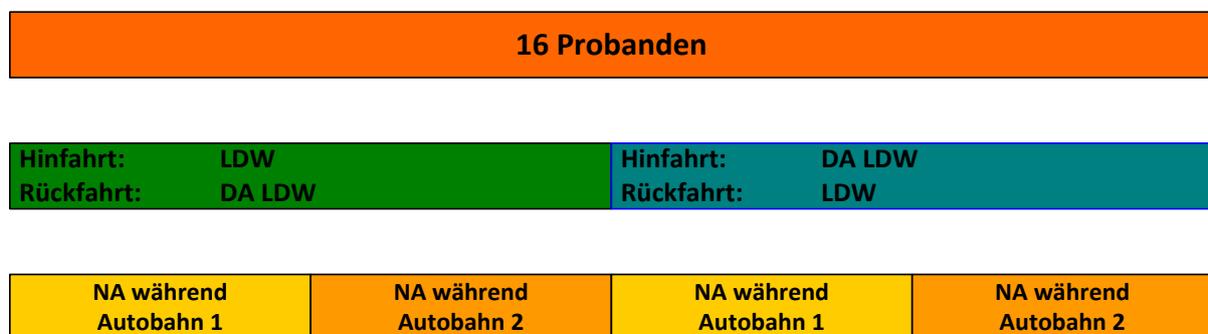


Abbildung 7.8: Aufteilung der Probanden (Terkes, 2007)

Durch die Permutation der beiden Systemauslegungen sowie der Streckenabschnitte, in denen die Nebenaufgaben bearbeitet werden mussten, ergeben sich die in Tabelle 7.4 dargestellten Varianten der Versuchskonfiguration. Jeder Proband bekam dabei die Nebenaufgabe nach dem Systemwechsel im selben Teilabschnitt gestellt.

| Versuchsperson | Erprobungsvariante | Hinfahrt | Rückfahrt | Nebenaufgabe in Streckenabschnitt |
|----------------|--------------------|----------|-----------|-----------------------------------|
| 1              | 4                  | DA LDW   | LDW       | 1                                 |
| 2              | 3                  | LDW      | DA LDW    | 1                                 |
| 3              | 3                  | LDW      | DA LDW    | 1                                 |
| 4              | 1                  | LDW      | DA LDW    | 3                                 |
| 5              | 1                  | LDW      | DA LDW    | 3                                 |
| 6              | 2                  | DA LDW   | LDW       | 3                                 |
| 7              | 2                  | DA LDW   | LDW       | 3                                 |
| 8              | 2                  | DA LDW   | LDW       | 3                                 |
| 9              | 2                  | DA LDW   | LDW       | 3                                 |
| 10             | 4                  | DA LDW   | LDW       | 1                                 |
| 11             | 1                  | LDW      | DA LDW    | 3                                 |
| 12             | 4                  | DA LDW   | LDW       | 1                                 |
| 13             | 3                  | LDW      | DA LDW    | 1                                 |
| 14             | 1                  | LDW      | DA LDW    | 3                                 |
| 15             | 4                  | DA LDW   | LDW       | 1                                 |
| 16             | 3                  | LDW      | DA LDW    | 1                                 |

Tabelle 7.4: Konfiguration der einzelnen Versuchsfahrten

Den prinzipiellen Ablauf einer Versuchsfahrt verdeutlicht die folgende Abbildung 7.9. Nach jedem absolvierten Streckenabschnitt wurde der entsprechende Teil des Fragebogens beantwortet. Die darin gestellten Fragen bezogen sich dabei jeweils explizit auf die zuletzt verwendete Systemauslegung. Der dritte und letzte Fragebogenteil wurde nach Abschluss der Testfahrt ausgefüllt.

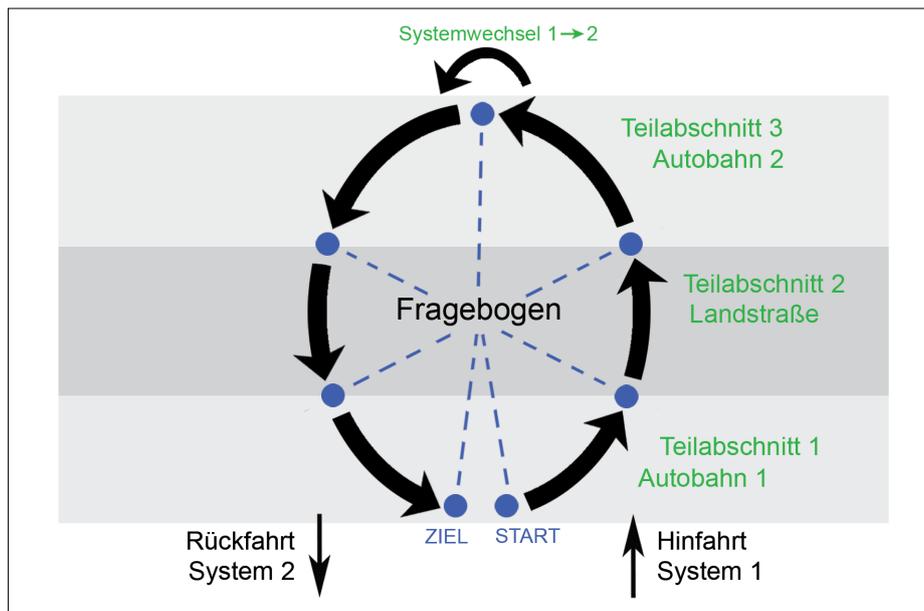


Abbildung 7.9: Ablauf einer Versuchsfahrt (Terkes, 2007)

### 7.2.2.3 Ergebnisse und Diskussion

Die Gruppe der 16 Versuchspersonen bestand aus 13 männlichen und 3 weiblichen Probanden. Das Durchschnittsalter der Probanden lag bei 25 Jahren und die durchschnittliche Führerscheinbesitzdauer betrug 7 Jahre.

#### Hypothese 1 – Anzahl der Warnungen

Insgesamt wurden in den Streckenabschnitten, in denen mit der Standard LDW-Konfiguration gefahren wurde, 203 Warnungen generiert und an den Fahrer durch eine Lenkradvibration ausgegeben. Circa 55% dieser Warnungen entfielen dabei auf den Landstraßenabschnitt (vgl. Abbildung 7.10 oben).

Auf den Teilstrecken mit aktivierter fahrraufmerksamkeitsadaptiver LDW-Ausprägung (vgl. Abbildung 7.6 unten) kam es zu 185 Situationen, in denen ein Standard LDW eine Warnung produziert und ausgegeben hätte. Unter Berücksichtigung der videogestützt ermittelten Informationen über den Fahreraufmerksamkeitszustand wurden allerdings nur 119 Warnungen ausgegeben. Dies entspricht einer Reduzierung der Anzahl der LDW-Warnungen um 36%.

Im konkreten Fall der kurvenreichen Landstraße (Teilabschnitt 2) konnte gezeigt werden, dass sich durch das fahrraufmerksamkeitsadaptive LDW die Anzahl der Warnungen sogar um 44% verglichen mit dem Standard LDW reduzieren lässt.

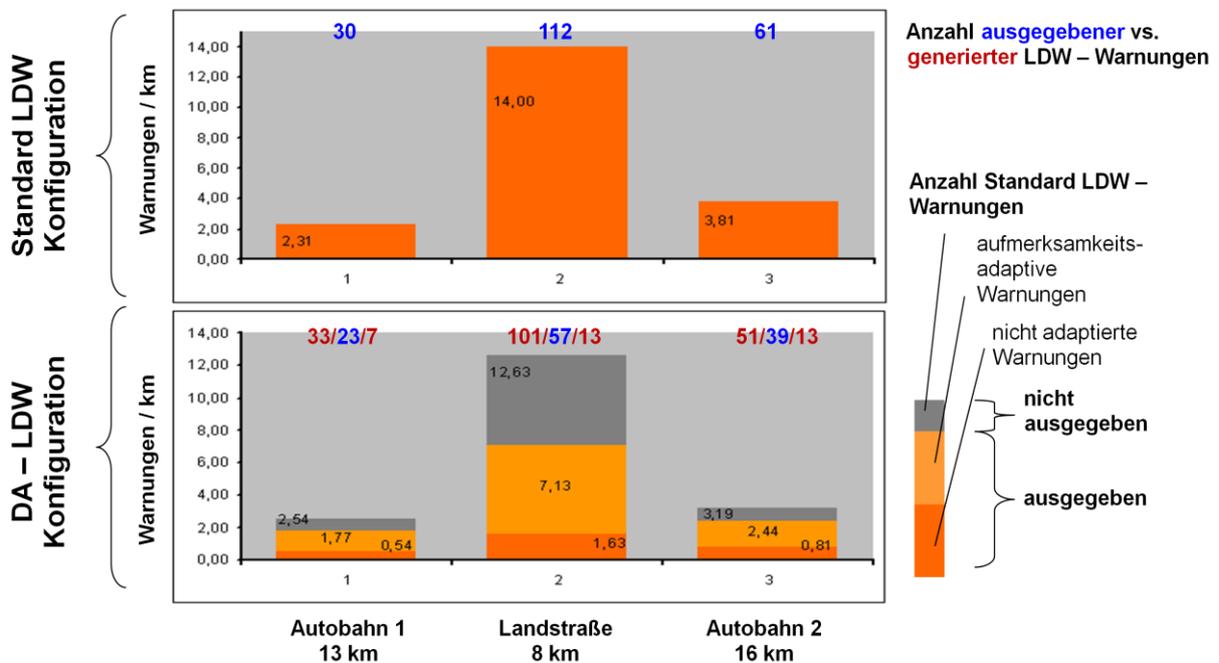


Abbildung 7.10: Gegenüberstellung der normierten Warnungen auf allen Streckenabschnitten

Betrachtet man die Differenz in der Anzahl der Warnungen zwischen Standard und DA LDW in den einzelnen Streckenabschnitten noch einmal im Detail, lässt sich feststellen, dass die Fahrer im ersten Streckenabschnitt ohne die Adaption 33 LDW-Warnungen erhalten hätten. Durch die Fahreradaptation kam es nur in 23 Situationen zu einer Lenkradvibration. Darin enthalten waren 7 Warnungen, die ohne Kenntnis der Kopforientierung und somit ohne Berücksichtigung einer Fahreraufmerksamkeits-schätzung ausgegeben wurden. Dies bedeutet, dass in den 7 Situationen keine Daten oder Daten mit nicht ausreichender Güte vom Fahrerbeobachtungssystem geliefert wurden und aus diesem Grund keine Adaption des LDW-Systems stattfand. Die Funktionalität des DA LDW entspricht in diesen Situationen der des Standard LDW.

Bezogen auf den Landstraßenabschnitt wären 101 LDW-Warnungen durch ein Standard LDW ausgegeben worden. Der Fahrer erhielt allerdings lediglich 57 Warnungen, davon 13 ohne Berücksichtigung des visuellen Fahreraufmerksamkeitsfokus.

Im letzten Streckenabschnitt wären 51 Warnungen ausgegeben worden, tatsächlich erhielten die Fahrer aber nur in 39 Fällen eine Lenkradvibration. Darin enthalten sind 13 Warnsituationen, in denen nur unzureichende Informationen über die Kopforientierung vorlagen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass bei einem Vergleich beider LDW-Systemauslegungen (Standard vs. Adaptiv) im ersten Streckenabschnitt kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Anzahl der Warnungen messbar war. Allerdings belegen die Ergebnisse der Messungen sowohl auf dem Landstraßenabschnitt als auch auf dem zweiten Autobahnabschnitt eine signifikante Reduzierung der LDW-Warnungen. Der Vergleich beider Systemauslegungen zeigt außerdem, dass in jedem Streckenabschnitt mehr Warnungen mit dem Standard LDW als mit Fahreradaptivem LDW produziert wurden. Dieser Unterschied zeigt sich bei den Autobahnfahrten lediglich geringfügig, ist jedoch nicht signifikant. Auf den Landstraßenfahrten macht sich dieser Sachverhalt hingegen stärker bemerkbar. Die Gegenüberstellung ergibt weiter, dass mit dem Standard LDW ca. 50% mehr Warnungen an den Fahrer ausgegeben wurden, als mit dem Fahreradaptiven LDW. Damit haben sich die als **Hypothese 1** (vgl. Absatz 7.2.2) aufgestellten Vermutungen als zutreffend erwiesen.

Die hohe Anzahl, der bei den Landstraßenfahrten produzierten Standard LDW-Warnungen, lässt sich unter anderem damit begründen, dass die Fahrspurmarkierungen im Gegensatz dazu bei Autobahnfahrten hauptsächlich bei Spurwechselforgängen überfahren wurden. Zu Beginn eines Spurwechselforganges erfolgte dabei häufig eine Betätigung des Blinkers, welcher die Warnungen des LDW systembedingt unterdrückt. Bei den Landstraßenfahrten wurden dem gegenübergestellt typischerweise die Markierungen in Vorbereitung eines Überholvorgangs, beim Überholen selbst sowie beim Kurvenschneiden überfahren. Letzt genannter Punkt ist besonders bei der gewählten

Teststrecke aufgrund der kurvenreichen Streckenführung spürbar. Da beim Kurvenschneiden und beim versetzten Fahren in Vorbereitung eines Überholvorgangs üblicherweise kein Blinker betätigt wurde, kam es in diesen Situationen zu keiner Warnunterdrückung.

Ein weiterer Grund für die stark reduzierte Anzahl von LDW-Warnungen im Landstraßenabschnitt ist möglicherweise die automatische ROI-Vergrößerung bei Kurvenfahrten in Richtung des Kurvenscheitels. Daraus resultiert in diesen Fällen eine größere ROI Fläche, innerhalb derer sich der Kopforientierungsvektor des Fahrers befinden kann und dieser als aufmerksam klassifiziert wird.

Ein weiterer Vergleich, bei dem nicht nur die beiden LDW-Systemauslegungen sondern auch die verschiedenen Streckenabschnitte gegenübergestellt werden, zeigt, dass zwischen der Anzahl der normierten Warnungen auf dem ersten und dem dritten Streckenabschnitt kein signifikanter Unterschied besteht. Somit kann der erste Autobahnteil mit dem zweiten Autobahnteil zusammengefasst betrachtet werden. Dies hat zur Folge, dass für die folgende Auswertung der subjektiven Probandenbeurteilungen nicht weiter zwischen den beiden Streckenabschnitten unterschieden werden muss.

### **Hypothese 2 – Subjektive Akzeptanzbewertung**

Im Folgenden wird lediglich auf die Punkte innerhalb des Fragebogens eingegangen, bei denen sich im Rahmen der Auswertung signifikante Unterschiede feststellen ließen. Um als signifikant zu gelten, musste ein Signifikanzgrenzwert von 5% unterschritten werden. In den sich anschließenden Darstellungen (vgl. Abbildung 7.11 und Abbildung 7.12) wird dabei der jeweilige Mittelwert der gegebenen Antworten eingezeichnet, das dazugehörige 95% Konfidenzintervall farblich hinterlegt und der ermittelte Signifikanzwert am rechten Abbildungsrand dargestellt.

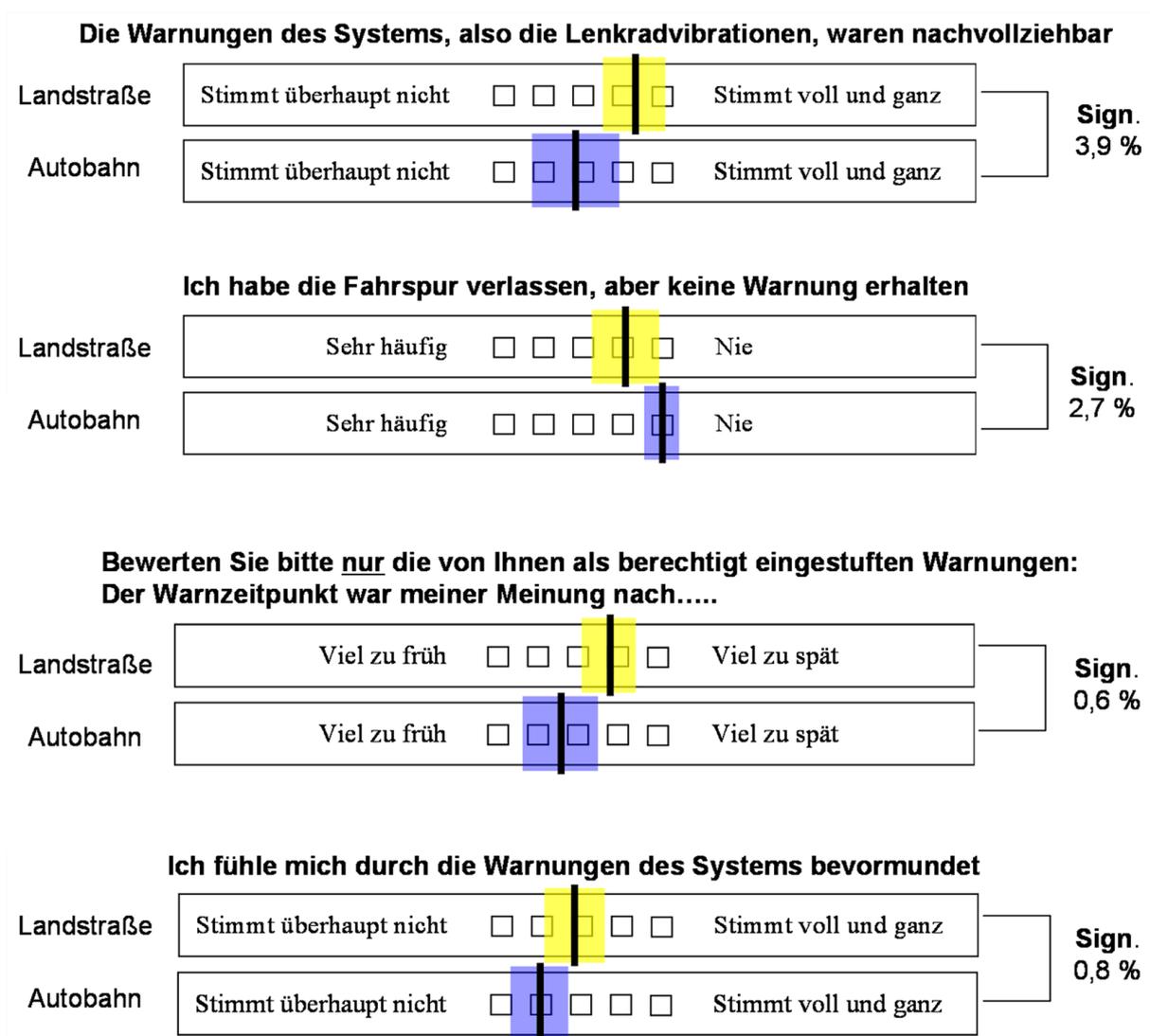


Abbildung 7.11: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Fragebogenauswertung zur Landstraßen- vs. Autobahnfahrt mit fahreraufmerksamkeitsadaptiven LDW (Terkes, 2007)

### Vergleich des Landstraßen- und Autobahnabschnittes mit einem DA LDW

In der Abbildung 7.11 werden die mit dem Fahreradaptiven LDW gesammelten Eindrücke der Probanden dargestellt. Die Probanden empfanden mit dieser Systemauslegung die Warnungen während der Landstraßenfahrt nachvollziehbarer als auf dem Autobahnabschnitt (vgl. Abbildung 7.11, Frage: „Die Warnungen des Systems, also die Lenkradvibrationen, waren nachvollziehbar“). Dieser Unterschied weist einen Signifikanzwert von 3,9% auf.

Die Antworten der Probanden auf die Frage: „Ich habe die Fahrspur verlassen, aber keine Warnung erhalten“, belegen, dass sich dieser Effekt eher auf der Landstraße, als auf der Autobahn bemerkbar macht. Der ermittelte Signifikanzwert liegt hier bei 2,7%. Das bei diesem Systemverhalten scheinbare

Ausbleiben von LDW-Warnungen resultiert aus der Fahreradaptation und wurde von den Versuchspersonen, die bewusst nicht über die Funktionsweise des fahreraufmerksamkeitsadaptiven LDW (vgl. Abbildung 7.6) in Kenntnis gesetzt waren, häufig als Fehlfunktion interpretiert. Weiterhin ist den gegebenen Antworten zu entnehmen, dass für die Autobahnfahrten mit geringen Abweichungen nahezu alle Probanden diese Frage mit „*nie*“ beantwortet haben (vgl. zugehöriges Streuintervall in Abbildung 7.11).

Die von den verschiedenen Probanden wahrgenommenen und dokumentierten Unterschiede hinsichtlich des variablen Warnzeitpunktes des DA LDW während der Landstraßen- im Vergleich zu der Autobahnfahrt, ergeben mit einem Signifikanzwert von 0,6%, dass die Mehrzahl der Versuchspersonen der Meinung war, dass die LDW-Warnungen während Landstraßenfahrten zu spät ausgegeben wurden. Die dazugehörige Fragestellung lautete: „*Der Warnzeitpunkt war meiner Meinung nach...*“, wobei nur die als berechtigt eingestuftten Warnungen bewertet werden sollten. Unter dem Begriff „*Warnzeitpunkt*“ wurde dabei verstanden, inwieweit eine Lenkradvibration in Folge eines Überschreitens oder Überquerens einer Fahrbahnmarkierung von den Versuchspersonen subjektiv als zeitlich korrekt oder nicht korrekt eingeschätzt wurde. Die Antworten auf diese Fragestellung deuten ebenfalls darauf hin, dass sich die Probanden ein späteres Warnen in Folge einer fahreraufmerksamkeitsgetriggerten LDW-Adaption implizit nicht erklären konnten und es somit als „*zu spät*“ beurteilten.

Die subjektiven Einschätzungen der Testpersonen auf die Frage „*Ich fühle mich durch die Warnungen des Systems bevormundet*“ ergaben ebenfalls einen mit 0,8% signifikanten Unterschied zwischen dem Landstraßen- und dem Autobahnabschnitt. Die Fahrer gaben zu Protokoll, dass, wenn sie sich durch das System bevormundet fühlten, dies eher auf der Landstraße der Fall war. Dieses Ergebnis verwundert nicht, da während der Landstraßenfahrten deutlich mehr LDW-Warnungen aufgetreten sind als bei den Autobahnfahrten (vgl. Abbildung 7.10).

### ***Gegenüberstellung beider Systemauslegungen (Standard LDW vs. DA LDW) auf der Landstraße***

Aufgrund der Probandenantworten auf die letztgenannte Fragestellung (vgl. auch Abbildung 7.11 unten) wurde zusätzlich auf dem Landstraßenabschnitt eine Datenerhebung, mit dem Ziel beide LDW-Systemkonfigurationen direkt miteinander vergleichen zu können, durchgeführt. Die Unterschiede, die sich dabei als signifikant herausgestellt haben, sind in Abbildung 7.12 grafisch dargestellt und werden im Folgenden diskutiert. Ein Vergleich beider Systemauslegungen auf dem Autobahnabschnitt fand im Rahmen dieser Arbeit nicht statt.

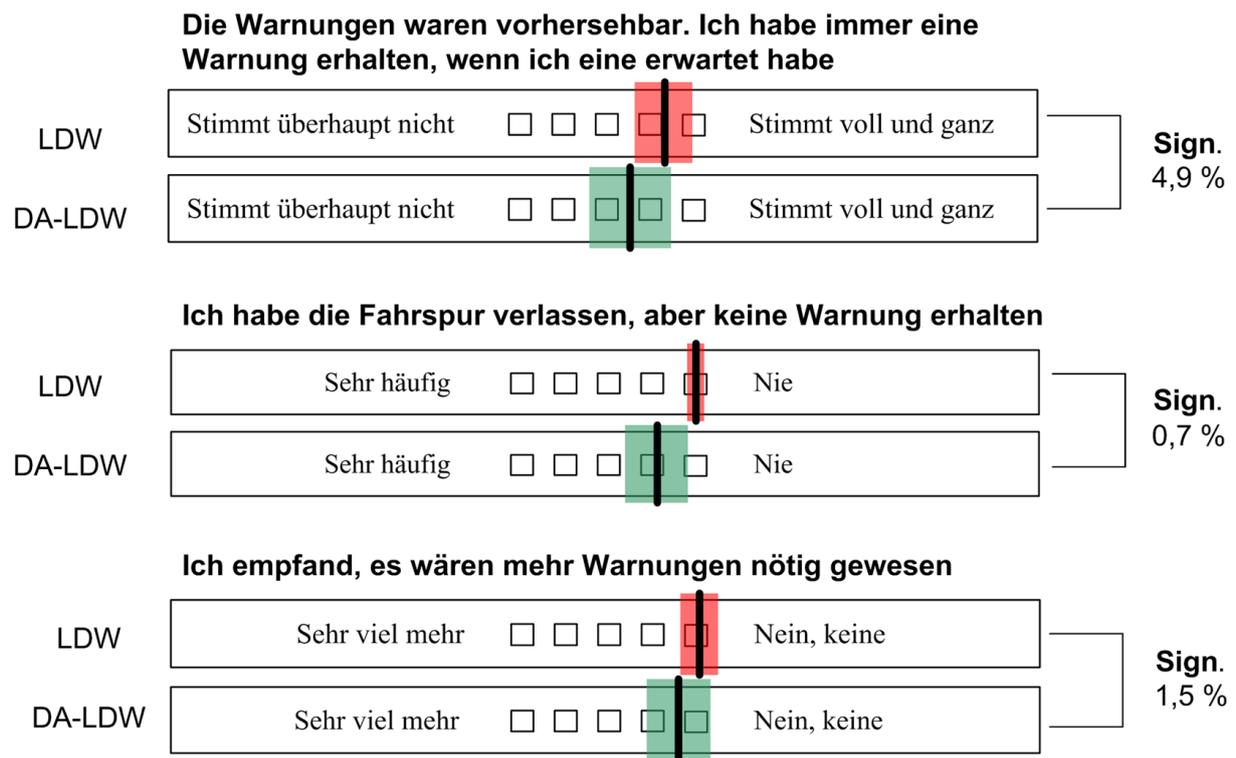


Abbildung 7.12: Gegenüberstellung der Probandenmeinungen zur Funktionalität Standard LDW vs. fahreraufmerksamkeitsadaptives LDW (DA LDW), (Terkes, 2007)

Die direkte Gegenüberstellung beider Systeme im Landstraßenabschnitt (vgl. Abbildung 7.12) ergab drei signifikante Unterschiede:

Das Standard LDW war bei diesen Fahrten tendenziell vorhersehbarer als das Fahreradaptive LDW (vgl. 1. Frage Abbildung 7.12). Der Unterschied trat dabei aber lediglich mit einer Signifikanz von 4,9% zu Tage. Dies lässt sich dadurch begründen, dass die Probanden bei dem Standard LDW immer eine Warnung erhielten, wenn sie die Fahrspur verlassen haben bzw. kurz davor waren diese zu verlassen. Beim DA LDW war dies im Gegensatz dazu nicht immer der Fall. Der Grund dafür liegt in der fahreraufmerksamkeitsadaptiven Auslegung des DA LDW basierend auf der jeweiligen Kopforientierung des Fahrers. Verglichen mit dem Standard LDW wurden dadurch vom adaptiven LDW rund 43% weniger Warnungen (vgl. Abbildung 7.10) ausgegeben. Dies schlägt sich auch in den Antworten auf die nächste Frage nieder.

Die Frage lautete noch einmal (vgl. Abbildung 7.11) „Ich habe die Fahrspur verlassen, aber keine Warnung erhalten“, zielte diesmal aber auf den Vergleich beider LDW-Systemausprägungen ab. Hierbei ergab sich ein signifikanter Unterschied von 0,7% dahingehend, dass mit dem Standard LDW nahezu jedes Mal eine Lenkradvibration erfolgte, wenn sich der Spurmarkierung genähert bzw. diese

überfahren wurde. Mit dem fahreraufmerksamkeitsadaptiven LDW trat dieser Effekt signifikant seltener auf.

Mit der letzten in Abbildung 7.12 dargestellten Frage „*Ich empfand, es wären mehr Warnungen nötig gewesen*“ wurde noch einmal der Effekt der deutlich verminderten Warnanzahl durch das Fahreradaptive LDW, verglichen mit der des Standard LDW, untersucht. Mit einer Signifikanz von 1,5% ergab sich folgender Unterschied: Nahezu jeder Proband hat diese Frage beim Standard LDW mit „*Nein, keine*“ beantwortet. Dem gegenüber wünschten sich ein Teil der Probanden tendenziell mehr Warnungen durch das Fahreradaptive LDW.

Eine mögliche Erklärung dieses Effektes könnte darin bestehen, dass die Probanden mit dem DA LDW deutlich weniger Warnungen erhielten. Nicht jedes Berühren einer Spurmarkierung, auch nicht eventuell bewusst herbeigeführtes, wurde beispielsweise mit einer Lenkradvibration quittiert. Somit vermissten die Versuchspersonen in bestimmten Situationen eine LDW-Warnung, da sie, wie bereits beschrieben, über die Funktionsweise des DA LDW im Vorfeld des Versuches nicht informiert worden waren. Betrachtet man jedoch die Antworten zum DA LDW bei dieser Frage absolut und nicht im Vergleich zum Standard LDW, kann festgestellt werden, dass die Zufriedenheit der Probanden mit der Anzahl der DA LDW-Warnungen sich trotzdem noch auf einem sehr hohen Akzeptanzniveau befindet.

Abschließend lässt sich zusammenfassen: Die Warnungen des fahreradaptiven Systems waren bei den Landstraßenfahrten nachvollziehbarer, als bei den Autobahnfahrten. Bei Verwendung des Fahreradaptiven LDW gab es jedoch Situationen, in denen die Probanden eine Warnung vermutet hätten, allerdings keine ausgegeben wurde. Dies führte bei den meisten Probanden zur Annahme, dass die Funktionalität des Standard LDW eingeschränkt sei. Dieser Effekt trat während der Landstraßenfahrten häufiger auf, als bei den Autobahnfahrten und hätte dadurch minimiert werden können, dass die Probanden im Vorfeld der Versuchsreihe über die Funktionsweise des fahreraufmerksamkeitsadaptiven LDW in Kenntnis gesetzt worden wären.

Die Antworten auf die beiden Fragen „*Die Warnungen des Systems, also die Lenkradvibrationen, waren nachvollziehbar*“ und „*Ich habe die Fahrspur verlassen, aber keine Warnung erhalten*“ zeigen deutlich, dass die Probanden einen Unterschied zwischen beiden Systemvarianten festgestellt haben. Den Probanden ist neben dem Ausbleiben einer LDW-Warnung ein weiterer Unterschied aufgefallen. Hierbei handelt es sich um den Zeitpunkt, an dem eine Lenkradvibration erfolgte. Die Probanden empfanden, dass sie die Warnungen des fahreradaptiven LDW zu spät erhielten.

Weiter lässt sich feststellen, dass die Probanden der Meinung waren, dass das Fahreradaptive LDW zu wenig Warnungen generiert, also in Situationen nicht warnt, in denen es erwartet worden wäre.

Anhand der Ergebnisse der Probandenbefragung kann nun geschlussfolgert werden, dass sich die Akzeptanz eines LDW-Systems nicht oder nur bedingt durch eine kopforientierungsbasierte Fahreraufmerksamkeitsadaption steigern lässt. Die unter **Hypothese 2** (vgl. Absatz 7.2.2) getroffenen Annahmen konnten somit nicht bestätigt werden.

Es sei aber an dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen, dass die dokumentierten Eindrücke der Probanden sowie die ermittelten Ergebnisse als auch die daraus gezogenen Schlüsse zuerst einmal nur für die untersuchten Streckenabschnitte bzw. für Abschnitte mit ähnlicher Streckencharakteristik gelten. Es wurde jedoch bei der Konzeption des Fragebogens und bei der Festlegung der Routenführung der Teststrecke darauf Wert gelegt, einen möglichst verallgemeinerbaren Datensatz zu erhalten. Dem gegenüber ist allerdings die nicht repräsentative Zusammensetzung der Probandengruppe hinsichtlich Alter und Geschlecht sowie die geringe Anzahl der Versuchspersonen zu nennen. Dennoch sollten die Ergebnisse der Versuchsreihen Tendenzen aufzeigen, die sich in ähnlicher Weise mit einer repräsentativeren Probandengruppe bestätigen lassen.

## 7.3 Fazit

Mit Blick auf die in Kapitel 2.8 unter dem Titel „Fahreraufmerksamkeit und Fahrerassistenz - Formen der Adaption“ aufgeführten Adaptionmöglichkeiten kann abschließend festgestellt werden, dass eine kopforientierungsabhängige Adaption der Warnzeitpunkte die Akzeptanz des **ACC-Systems** nicht vermindert und einen Gewinn an Sicherheit generiert.

Im Rahmen der durchgeführten Simulatorstudien hat sich gezeigt, dass 82% der Probanden keinen Unterschied zwischen den beiden Systemausprägungen bemerken konnten. Dies bestätigt, dass sich die Akzeptanz des Systems durch die Anpassung nicht verändert. Bei 81% der Probanden konnte gezeigt werden, dass diese bei Ablenkung durch das zeitliche Vorziehen der Warnung früher auf eine gefährliche Situation reagieren konnten. Dies bestätigt den potentiell möglichen Sicherheitsgewinn durch eine derartige Anpassung.

Auszüge der hier vorgestellten Ansätze und Ergebnisse sind ebenfalls in den im Rahmen dieser Arbeit erfolgten Veröffentlichungen Trefflich (2008a) und (2008b) enthalten.

Ziel der zum Thema „fahreraufmerksamkeitsadaptives LDW“ durchgeführten Arbeiten war zum einen der Nachweis, dass sich durch eine kopforientierungsabhängige **LDW-Auslegung** die Anzahl der

ausgegebenen Warnungen deutlich reduzieren lässt. Zum anderen wurde vermutet, dass durch ein Reduzieren der Warnungen, unter Verwendung des mit der visuellen Aufmerksamkeit korrelierenden Parameters Kopforientierung, eine höhere Systemakzeptanz erreicht wird (vgl. dazu Kapitel 2.8.3 und 2.8.4 zu Warnunterdrückung und Akzeptanz). Beide Punkte wurden im Rahmen einer Probandenstudie im realen Straßenverkehr evaluiert. Dabei konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, durch die vorgenommenen Systemmodifikationen in den untersuchten Szenarien die Anzahl der Warnungen um ca. 41% zu verringern. Ein Nachweis, dass sich dadurch gleichzeitig eine Steigerung der Akzeptanz des **LDW-Systems** erreichen lässt, konnte allerdings nicht erbracht werden (vgl. auch Pohl (2007)).

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Kopforientierung einen Parameter darstellt, dessen Veränderungen vom Menschen selbst nur sehr unscharf wahrgenommen werden. Adaptiert man ein FAS, wie hier am Beispiel LDW geschehen, mit einer sehr sensitiven Regelung in direkter Abhängigkeit von dieser Messgröße, erscheint dann das Systemverhalten für viele Personen nicht mehr plausibel nachvollziehbar. Dies schlägt sich wiederum in einer geringeren Akzeptanz des Gesamtsystems nieder.

## 8 Zusammenfassung, Gesamtbewertung und Ausblick

Ziel der vorliegenden Arbeit war es zu untersuchen, inwieweit mit Hilfe eines monokularen kamera-basierten Fahrerbeobachtungssystems die Aufmerksamkeit des Fahrers in typischen Fahrsituationen auf Basis einer Auswertung der Kopforientierung ermittelt werden kann. Desweiteren sollten die Verbesserungspotentiale von Fahrerassistenzsystemen durch die Berücksichtigung der Fahreraufmerksamkeit innerhalb ihrer Warnkonzepte am Beispiel eines Abstandsregeltempomaten (ACC) sowie eines Spurverlassenswarner (LDW) aufgezeigt und diskutiert werden.

Dafür wurde in **Kapitel 2** zunächst auf Basis einer umfassenden Literaturrecherche ein Überblick über die physiologischen und psychologischen Grundlagen des Begriffes „Fahreraufmerksamkeit“ und aller wesentlichen damit verbundenen Termini gegeben. Dabei wurden die verschiedenen Aspekte und mögliche Modellierungen des Aufmerksamkeitsbegriffes erläutert, sowie anschließend auf die verschiedenen menschlichen Sinneskanäle eingegangen. Die besondere Bedeutung des visuellen Sinneskanals für die Fahrzeugführung wurde dabei herausgearbeitet. Daran schließt sich eine Beschreibung und Diskussion verschiedener Parameter an, anhand derer auf den Fahrerzustand bzw. die –aufmerksamkeit geschlossen werden kann. Fokus bei dieser Zusammenstellung bildeten die videobasiert messbaren Größen Kopforientierung und Blickrichtung. Es wurden vielversprechende Ansätze aus der Literatur diskutiert, die darauf hindeuten, dass anhand der Kopforientierung in Verbindung mit einer „Aufmerksamkeitsregion“ und einer zeitlichen Abwendungskritikalitätsschwelle, belastbare Aussagen über die Fahreraufmerksamkeit möglich sind. Das Grundlagenkapitel endet mit einer Vorstellung verschiedener Adaptionmöglichkeiten von Fahrerassistenzsystemen hinsichtlich der Fahreraufmerksamkeit.

Das folgende **Kapitel 3** wurde darauf verwandt, sowohl die beiden Assistenzsysteme ACC und LDW im Detail zu erläutern als auch alle im Rahmen dieser Arbeit zum Einsatz gekommenen Messsysteme und Sensoren zu beschreiben.

Im sich daran anschließenden **Kapitel 4** wird eine Methodik präsentiert, mit deren Hilfe es möglich ist, verschiedene kamerabasierte Driver Monitoring Systeme hinsichtlich ihres Erfassungsbereiches und ihrer Messgenauigkeit bei der Verfolgung der Kopfpose zu beurteilen. Innerhalb einer ersten Versuchsreihe wurde die Funktionsfähigkeit der Methodik demonstriert. Dabei kam beispielhaft für ein monovideobasiertes Fahrerbeobachtungssystem der Driver State Sensors zum Einsatz. Auf Grundlage dieses Sensors und der Bewertungsmethodik konnten erste Aussagen über die zu

erwartende Genauigkeit der ermittelten Kopforientierung sowie den Erfassungsbereich erarbeitet werden.

**Kapitel 5** widmet sich dann der Wechselbeziehung von Blickrichtung und Kopforientierung. Im Rahmen einer breit angelegten Versuchsreihe in Zusammenarbeit mit dem Institut für Arbeitswissenschaften an der Universität der Bundeswehr konnte festgestellt werden, dass die typische Kopforientierung eines Fahrers während der Fahrt nicht vom gerade befahrenen Straßentyp abhängt und in diesem Zusammenhang nahezu keine interindividuellen Unterschiede auftreten. Weiterhin ließ sich ableiten, dass die Distanz zwischen Blickrichtungs- und Gesichtsnormalenvektor innerhalb des menschlichen Blickfeldes stark vom Blickort abhängt und zudem von großen interindividuellen Unterschieden überlagert wird. Diese interindividuellen Differenzen waren auf Basis der im Zuge dieser Versuchsreihe erhobenen personenspezifischen Merkmale der Probanden nicht erklärbar. Das Kapitel schließt mit der Feststellung, dass auf der Grundlage einer monovideogestützt ermittelten Kopforientierung des Fahrers, in Verbindung mit einer „Aufmerksamkeitsregion“ sowie einer kritischen Abwendungsdauer, grobe Einschätzungen darüber möglich sind, ob dieser gerade abgelenkt ist oder nicht.

Zu Beginn des **Kapitels 6** wird noch einmal aufgezeigt, dass die Ergebnisse der Versuchsreihen aus Kapitel 4 und 5 den Schluss nahelegen, dass eine Klassifizierung des Aufmerksamkeitsgrades des Fahrers mit einer feineren Abstufung, als einer binären Entscheidung „Fahrer aufmerksam“ vs. „Fahrer unaufmerksam“ unter den gegebenen Randbedingungen weder zuverlässig realisierbar noch zielführend ist. Im weiteren Verlauf des Kapitels werden darauf aufbauend zwei Aufmerksamkeitsklassifikatoren, basierend auf der Kopforientierung des Fahrers vorgestellt. Beide verwenden eine „Aufmerksamkeitsregion“, die im zentralen Sichtfeld direkt vor dem Fahrer definiert wurde. In der ersten Realisierung ist diese „Region of Interest“ (ROI) räumlich fix und in ihrer Lage nicht veränderlich. Im zweiten Fall ist die ROI in gewissen Grenzen in ihrer Lage verschiebbar und kann sich somit besser den interindividuell unterschiedlichen Blick- bzw. Kopfbewegungsstrategien verschiedener Fahrer anpassen. Ein abschließender Vergleich beider Implementierungen bestätigt die deutlichen Vorteile der „dynamischen“ im Vergleich zur „statischen ROI“.

In **Kapitel 7** wird abschließend auf zwei Möglichkeiten eingegangen, wie sich die durch den „dynamischen ROI Ansatz“ ermittelte Information „Fahrer aufmerksam“ bzw. „Fahrer unaufmerksam“ bei der Adaption von FAS Warnstrategien sinnvoll berücksichtigen lässt. Die Umsetzung des fahreraufmerksamkeitsadaptiven LDW geschah dabei mit dem Ziel einer deutlichen Reduzierung der Anzahl ausgegebener LDW-Warnungen im Vergleich zum Standard LDW. Vermutet wurde dabei, dass dadurch, dass nur noch LDW-Warnungen im Zustand „Fahrer unaufmerksam“ ausgegeben werden, die Signifikanz der ausgegeben Warnungen und damit die Akzeptanz des LDW-Systems durch den

Fahrer deutlich zunimmt. Es konnte gezeigt werden, dass sich mit diesem kopforientierungsbasierten Ansatz zwar die Anzahl an LDW-Warnungen deutlich reduzieren lässt, die Akzeptanz dieses FAS sich dadurch aber nicht wesentlich verändert.

Ähnliches belegen die Ergebnisse der Untersuchung der ebenfalls in **Kapitel 7** beschriebenen fahrer-aufmerksamkeitsadaptiven Auslegung eines Abstandsgesteuerten Tempomaten (ACC-System). Im Falle dieser Adaptionenvariante bemerkten die Fahrer keinen Unterschied zum Standard ACC-System. Die Systemakzeptanz blieb dadurch unverändert. Allerdings konnte anhand dieser Implementierung demonstriert werden, dass durch ein Einbeziehen der Fahreraufmerksamkeit in die Warnstrategie eines Fahrerassistenzsystems, eine Steigerung der Verkehrssicherheit bei gleichbleibender Systemakzeptanz erreicht werden kann.

Die Beschränkung auf die Kopforientierung als wesentlichen Parameter für die Bestimmung der Fahreraufmerksamkeit und die damit im Rahmen der vorliegenden Dissertation erhaltenen Resultate bieten eine Reihe von Ansatzpunkten für weitere Arbeiten. Auf die aus Sicht des Autors vielversprechendsten sei im Folgenden kurz eingegangen.

Zu erwähnen wäre dabei zum Einen die Weiterentwicklung der Fahreraufmerksamkeitsdetektion in Richtung einer Blickrichtungserkennung. Die Autoren Petersson et al. (2005) sowie Fletcher (2008) geben in ihren Publikationen dazu interessante Denkanstöße. Die in diesen Veröffentlichungen vorgestellten Ansätze zeigen das große Potential auf, das sich aus einer Fusion von Fahrzeugumfeldsensorik, hier im konkreten Fall eine Szenenkamera zur Beobachtung des vorausfahrenden Verkehrs, und einem Blickrichtungsdetektionssystem ergeben kann. Anhand entsprechender Algorithmen wäre mit einem solchen System erkennbar, auf welchen Reiz (z.B. ein Verkehrsschild) der Fahrer seinen Blick tatsächlich ausgerichtet hat. Darüber hinaus wäre es möglich, aus der zugehörigen Fixationszeit abzuleiten, ob das Objekt überhaupt wahrgenommen wurde. Ist ein zukünftiges Blickrichtungserkennungssystem hinreichend genau, um Sakkaden zuverlässig zu detektieren, könnte auf der Grundlage dessen aus den Augenbewegungen auf die kognitive Aufmerksamkeit bzw. den Verarbeitungsprozess geschlossen werden. Mit dem aktuellen Stand der Technik scheint dies allerdings in absehbarer Zeit in Fahrzeugen noch nicht möglich.

Weiteres Potential für zukünftige Arbeiten könnte in der Fusion verschiedener, den Fahrerzustand beschreibender, Messgrößen (vgl. Kapitel 2.7) in einem einzigen „Fahrerzustandsklassifikator“ liegen. Der Vorteil würde dabei darin bestehen, dass sich die Klassifikation auf verschiedene zum Teil voneinander unabhängige Parameter stützen könnte. Ein deutlicher Gewinn an Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit und Aussagekraft sollte damit einhergehen.

# Literaturverzeichnis

**Adam, E.C. 1993.** Fighter cockpits of the future. *Proceedings of the 12th IEEE/AIAA Digital Avionics Systems Conference (DASC)*. 1993, S. 318-323.

**Algermissel, L. 2008.** Welt Online. *Kann man Autos überhaupt noch sicherer bauen?* [Online] Oktober 2008. <http://www.welt.de/motor/article2650775/Kann-man-Autos-ueberhaupt-noch-sicherer-bauen.html>.

**Allport, D. A. 1987.** Selection for Action: Some behavioral and neurophysiological considerations of attention and action. [Buchverf.] H. Heuer and A.F. Sanders (Eds.). *Perspectives on perception and action*. Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum Associates, 1987.

**Ascension Technology Corporation . 2007.** [Online] Juni 2007. <http://www.ascension-tech.com/products/laserbird.php>.

**Ascension Technology Corporation. 2004.** laserBird - Installation and Operation Guide. [Online] April 2004. [www.ascension-tech.com](http://www.ascension-tech.com).

**Autobild.de. 2007.** Kampf der Müdigkeit - Mercedes "Attention Assist". [Online] 13. Dezember 2007. [http://www.autobild.de/artikel/mercedes-quot-attention-assist-quot-\\_509888.html](http://www.autobild.de/artikel/mercedes-quot-attention-assist-quot-_509888.html).

**Autosieger.de. 2008.** Volvo-Warnsystem gegen Übermüdung und Verlassen der Fahrbahn. [Online] September 2008. <http://www.autosieger.de/article13185.html>.

**Baumann, M. R. K., Petzold, T., Krems, J. 2006.** Situation Awareness beim Autofahren als Verstehensprozess. *MMI-Interaktiv "Aufmerksamkeit und Situation Awareness im Fahrzeug"*. Dezember 2006, Bd. Nr. 11, S. 43-57.

**Belz, S. M. 2000.** *Dissertation: An On-Road Investigation of Self-Rating of Alertness and Temporal Separation as Indicators of Driver Fatigue in Commercial Motor Vehicle Operators*. Blacksburg : Virginia Polytechnic Institute and State University, 2000. verfügbar unter: [http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-11152000-13100048/unrestricted/belz\\_dissertation.pdf](http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-11152000-13100048/unrestricted/belz_dissertation.pdf).

**BFFT. 2009.** BFFT - Gesellschaft für Fahrzeugtechnik mbH. [Online] Mai 2009. <http://www.bfft.de/>.

**Blaschke, C., Schmitt, J. & Färber, B. 2007.** Fahrmanöver-Prädiktion über CAN-Bus Daten. *VDI-Berichte: Fahrer im 21. Jahrhundert - Human Machine Interface*. Düsseldorf : VDI-Verlag, 2007, S. 165-177.

**Blawat, K. 2007.** Risiko statt Sicherheit - Der Mensch sucht die Gefahr. [Online] September 2007. <http://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/0,1518,505448,00.html>.

**Bosch. 2002.** *Adaptive Fahrgeschwindigkeitsregelung ACC, Gelbe Reihe*. s.l. : Bosch (Technische Unterrichtung, Sicherheits- und Komfortsysteme), 2002.

- Breitmeyer, B. G. & Braun, D. 1990.** Effects of Fixation and Attention on Saccadic Reaction Time. [Buchverf.] R., d'Ydewalle, G. & Parham, R. Groner. *From Eye to Mind - Information Acquisition in Perception, Search and Reading*. Amsterdam : North-Holland, 1990, S. 71-79.
- Brown, I. D. 2005.** *Review of the 'Looked but Failed to See' Accident Causation Factor*. London : Department for Transport:, 2005.
- Bruckmayr, E., Reker, K. 1994.** Neue Informationstechniken im Kraftfahrzeug - Eine Quelle der Ablenkung und der informatorischen Überlastung? *Zeitschrift für Verkehrssicherheit*. 1994, 40.
- Bubb, H. 2003.** Fahrerassistenz - primär ein Beitrag zum Komfort oder für die Sicherheit? [Hrsg.] VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik. *VDI-Konferenzband zu "Fahrer im 21. Jahrhundert"*. 2003, Bd. 1768, S. 25-44.
- Buld, S., Krüger, H.-P. 2002.** *Wirkung von Assistenz und Automation auf Fahrerzustand und Fahrsicherheit*. 2002. Abschlussbericht zum Förderprojekt EMPHASIS.
- Cacioppo, J.T. & Tassinari, L.G. 1990.** Inferring psychological significance from physiological signals. *American Psychologist*. 1990, Bd. 45, 1, S. 16-28.
- Chen, L.-K. & Ulsoy, A. G. 2001.** Identification of a Driver Steering Model, and Model Uncertainty, From Driving Simulator Data. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. 123, 2001, S. 623-629.
- Continental Automotive. 2007.** [Online] 15. Januar 2007. [http://www.continental.com/generator/www/de/de/cas/cas/themen/produkte/elektr\\_brems\\_und\\_sicherheit/fahrerassistenzsysteme/spurhalteassistenz\\_de.html](http://www.continental.com/generator/www/de/de/cas/cas/themen/produkte/elektr_brems_und_sicherheit/fahrerassistenzsysteme/spurhalteassistenz_de.html).
- Crundall, D. E., Underwood, G. 1998.** Effects of experience and processing demands on visual information acquisition in drivers. *Ergonomics*. 41, 1998, Bd. 4, S. 448 - 458.
- Crundall, D., Underwood, G., Chapman, P. 1999.** Driving experience and the functional field of view. *Perception*. 28, 1999, S. 1075-1087.
- Daimler Communications. 2007.** Unfallursache Übermüdung: Neues Mercedes-System warnt den Autofahrer - Pressemeldung. 2007.
- Deutscher Verkehrssicherheitsrat e.V. 2006.** "Fahrerassistenzsysteme als beste Beifahrer". [Online] 2006. [www.dvr.de](http://www.dvr.de).
- DIN VDE Norm 0119-207-5. 2004.** *Zustand der Eisenbahnfahrzeuge - Leittechnik - Teil 207-5: Sicherheitsfahrerschaltung (Sifa)*. Berlin und Frankfurt am Main : DIN Deutsches Institut für Normung e.V. und VDE Verband der Elektrotechnik Informationstechnik e.V., 2004.
- Dominguez, C., Vidulich, M., Vogel, E., McMillan, G. 1994.** Situation awareness. *Papers and annotated bibliography*. Armstrong Laboratory, Human System Center. 1994.

- Donges, E. 1978.** A two level-model of driver steering behavior. *Human Factors*. 20, 1978, 6, S. 691-707.
- Dornhöfer, S. M. & Pannasch, S. 2000.** *Erhöhung der Verkehrssicherheit durch die Online-Registrierung von Blickbewegungsparametern*. TU Dresden : s.n., 2000.
- Dorsch, F., Häcker, H. Stapf, K.-H. 1987.** *Dorsch Psychologisches Wörterbuch*. Bern Stuttgart Toronto : Hans Huber, 1987. S. 737-738. ISBN: 3-456-81614-6.
- Endsley, M.R. 1995.** Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human Factors*. 37(1), 1995, S. 32-64.
- European Commission. 2005.** *European Statement of Principles on the Design of Human Machine Interaction (ESoP)*. s.l. : Information Society Technologies, 2005.
- Fairclough, S. & Maternagan, M. 1993.** Changes in drivers visual behavior due to the introduction of complex versus simple route navigation information. [Buchverf.] A. Gale & K. Carr D. Brogan. *Visual search 2*. London : Taylor & Francis, 1993.
- Färber, B. & Färber, B. 2004.** Mehr Verkehrssicherheit durch intelligente Steuerung von Telematik-Systemen? [Buchverf.] B. Schlag. *Verkehrspsychologie - Mobilität - Sicherheit - Fahrerassistenz*. Lengerich : Pabst Science Publishers, 2004.
- Färber, B. 2005.** Erhöhter Fahrernutzen durch Integration von Fahrerassistenz- und Fahrerinformationssystemen. [Buchverf.] M. Maurer & C. Stiller. *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*. Berlin-Heidelberg : Springer-Verlag, 2005, S. 141-160.
- . **1987.** *Geteilte Aufmerksamkeit - Grundlagen und Anwendung im motorisierten Straßenverkehr*. Köln : TÜV Rheinland GmbH, 1987. ISBN 3-88585-452-X.
- Fletcher, L. & Zelinsky, A. 2008.** Context Sensitive Driver Assistance Based on Gaze - Road Scene Correlation. [Buchverf.] O. Khatib, V. Kumar und D. Rus. *Experimental Robotics*. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2008, S. 287-296.
- Focus Online. 2007.** [Online] 09. 05 2007. [Zitat vom: 15. Januar 2008.] [http://www.focus.de/auto/unterwegs/strassenverkehr\\_aid\\_55756.html](http://www.focus.de/auto/unterwegs/strassenverkehr_aid_55756.html).
- Frijda, N.H. 1986.** The Emotions. *Editions de la Maison des sciences de l'homme*. 1986.
- Geißler, N. 2008.** Die Augen von Kamera und Radar entlasten den . *Continental Automotive AG*. [Online] August 2008. [http://www.conti-online.com/generator/www/de/de/cas/just\\_drive/general/links/hidden/radar\\_08\\_09\\_2008\\_de.html](http://www.conti-online.com/generator/www/de/de/cas/just_drive/general/links/hidden/radar_08_09_2008_de.html).
- Grossman, S. B. 1963.** *A Textbook of Physiological Psychology*. New York : Wiley, 1963. S. 181-240.
- Grünweg, T. 2007.** Bevor der Fahrer fähig wird. [Online] September 2007. <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/0,1518,503575,00.html>.

- Grüsser, O.-J., Grüsser-Cornehls, U. 1987.** Gesichtssinn. [Buchverf.] G. Thews R.F. Schmidt. *Physiologie des Menschen*. s.l. : Springer-Verlag, 1987, S. 249-290.
- Hargutt, V. 2001.** Dissertation: Das Lidschlussverhalten als Indikator für Aufmerksamkeits- und Müdigkeitsprozesse bei Arbeitshandlungen. *VDI-Fortschritt-Bericht Nr.17*. Düsseldorf : VDI-Verlag, 2001, Bd. 233.
- Healey, J., Seger, J. & Picard, R. 1999.** Quantifying Driver Stress: Developing a System for Collecting and Processing Bio-Metric Signals in Natural Situations. *Proceedings of the Rocky Mountain Bio-Engineering Symposium*. 1999. zu finden unter: <http://vismod.media.mit.edu/tech-reports/TR-483/index.html>.
- Heinzmann, J. & Zelinsky, A. 1998.** *3-D Facial Pose and Gaze Point Estimation using a Robust Real-Time Tracking Paradigm*. 1998. S. 142-147, Proceedings of the International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition. verfügbar unter: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.30.5759&rep=rep1&type=pdf>.
- **1997.** *Robust Real-Time Face Tracking and Gesture Recognition*. 1997. In Proceedings of the Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence, IJCAI'97. verfügbar unter: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.106.9709&rep=rep1&type=pdf>.
- Helander, M. 1978.** Applicability of drivers' electrodermal response to the design of the traffic environment. *The Journal of applied psychology*. 1978, Bd. 63, 4, S. 481-488.
- Hell, W. 2004.** *Unfallursache Einschlafen - Auftreten und Prävention von Müdigkeitsunfällen im Straßenverkehr*. Goslar : s.n., 2004.
- Hella, F. 1987.** Is the analysis of eye movements recording a sufficient criterion for evaluating automobile instrument panel design? [Buchverf.] J. K. O'Regan & A. Lévy-Schoen. *Eye Movements: From Physiology to Cognition*. Amsterdam : Elsevier, 1987.
- Herslund, M. B., Jørgensen, N. O. 2003.** Looked-but-failed-to-see-errors in traffic. *Accident Analysis and Prevention* 35. s.l. : Elsevier, 2003, S. 885–891.
- Hess, R. A. & Modjtahedzadeh, A. 1990.** A Control Theoretic Model of Driver Steering Behavior. *IEEE Control Systems Magazine*. 1990, S. 3-8.
- Heyn, F. 2000.** Monitorsystem überwacht Müdigkeit von Piloten. [Online] November 2000. <http://presstext.com/news/001130036/monitorsystem-ueberwacht-muedigkeit-von-piloten/>.
- Hinkelbein, J., Dambier, M. 2007.** *Flugmedizin und Flugpsychologie für die Privatpilotenausbildung*. Hördt, Pfalz : aeromed Consult, 2007. S. 181-196. ISBN: 3-00-020097-5.
- ISO 15007-1.** *Road vehicles -- Measurement of driver visual behaviour with respect to transport information and control systems -- Part 1: Definitions and parameters*. 2002 : s.n.
- James, W. 1890.** *Principles of Psychology*. 1890.

**Johannsen, G. 1993.** *Mensch-Maschine-Systeme*. Berlin Heidelberg New York : Springer Verlag, 1993. S. 263-265. ISBN: 3-540-56152-8.

— **2008.** Überwachung, Entscheidung und Supervisory Control in Mensch-Maschine-Systemen. [Buchverf.] L. Schmidt, C. M. Schlick und J. Grosche. *Ergonomie und Mensch-Maschine-Systeme*. Berlin : Springer Verlag, 2008, S. 51-66.

**Johannsen, G., Rouse, W. B. 1979.** Mathematical concepts for modeling human behavior in complex man-machine systems. *Human Factors*. 1979, Vol. 21, S. 733-747.

— **1983.** Studies of planning behavior of aircraft pilots in normal, abnormal, and emergency situations. 1983, Vol. SMC-13, S. 267 - 278.

**KfzTech. 2008.** [www.kfztech.de](http://www.kfztech.de). [Online] 2008. <http://www.kfztech.de/kfztechnik/sicherheit/acc.htm>.

**King, D. J., Mumford D. K. & Siegmund, G. P. 1998.** An Algorithm for Detecting Heavy-Truck Driver Fatigue from Steering Wheel Motion. 1998, S. 873-882.

**Knoll, P. M. 2007.** Wie kann die Technik das Verhalten beeinflussen? Fahrerassistenzsysteme - Innovationen für Komfort und Sicherheit. *Konferenzband: Verkehrssicherheitskongress 2007*. 2007. verfügbar unter: [http://www.verkehrssicherheitskongress.de/abstracts/A\\_2007\\_Knoll\\_Fahrerassistenzsysteme.pdf](http://www.verkehrssicherheitskongress.de/abstracts/A_2007_Knoll_Fahrerassistenzsysteme.pdf).

**Koga, K. & Groner, R. 1990.** Pursuit Eye Movements and the Perception of Object Motion. [Buchverf.] R., d'Ydewalle, G. & Parham, R. Groner. *From Eye to Mind - Information Acquisition in Perception, Search and Reading*. Amsterdam : North-Holland, 1990, S. 59-68.

**Kopf, M. 2005.** Was nützt es dem Fahrer, wenn Fahrerinformations- und -assistenzsysteme etwas über ihn wissen? [Buchverf.] M. Maurer & C. Stiller. *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2005, S. 117-139.

**Krüger, H.-P., Rauch, N., Schoch, S. 2007.** *Ermittlung von Fahreraufmerksamkeit aus Fahrverhalten*. 2007.

**Latimer, C.R. 1990.** Eye-Movement Indices of Form Perception: Some Methods and Preliminary Results. [Buchverf.] R., d'Ydewalle, G. & Parham, R. Groner. *From Eye to Mind - Information Acquisition in Perception, Search and Reading*. Amsterdam : North-Holland, 1990, S. 41-57.

**Lexus. 2009.** Lexus LS - Gesichtsfeldmonitor. [Online] 2009. <http://www.lexus.de/range/ls/key-features/safety/safety-driver-monitoring-system.aspx>.

**Longhurst, G. 2004.** Understanding Driver Visual Behaviour. [Online] 2004. [http://www.seeingmachines.com/pdfs/media\\_coverage/2002/2002\\_TTI\\_p92.pdf](http://www.seeingmachines.com/pdfs/media_coverage/2002/2002_TTI_p92.pdf).

**Mack, Arien & Rock, Irvin. 1998.** *Inattentional Blindness*. Cambridge : MIT Press, 1998.

- Martens, M.H. & van Winsum, W. 2000.** Measuring distraction: the Peripheral Detection Task. *TNO Human Factors, Soesterberg, The Netherlands*. [Online] 2000. <http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/departments/nrd-13/driver-distraction/PDF/34.PDF>.
- McCall, J. C. & Trivedi, M. M. 2004.** Visual Context Capture and Analysis for Driver Attention Monitoring. *Proceedings of IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*. 2004, S. 332-337.
- Mieg, H.-P. 2006.** *Vigilanzentwicklung unter nCPAP-Therapie beim obstruktiven Schlafapnoesyndrom unter Berücksichtigung der zirkadianen Rhythmik*. Fachbereich Humanmedizin. Freie Universität Berlin : s.n., 2006. PhD Thesis.
- Miura, T. 1990.** Active function of eye movement and useful field of view in a realistic setting. [Buchverf.] d'Ydewalle & R. Parham R. Groner. *From Eye to Mind: Information Acquisition in Perception, Search, and Reading*. Amsterdam : North-Holland Press, 1990, S. 119 - 127.
- Nattkemper, D. & Prinz, W. 1990.** Local and Global Control of Saccade Amplitude and Fixation Duration in Continuous Visual Search. [Buchverf.] R., d'Ydewalle, G. & Parham, R. Groner. *From Eye to Mind - Information Acquisition in Perception, Search and Reading*. Amsterdam : North-Holland, 1990.
- Neumann, O. 1987.** Beyond capacity: A functional view of attention. [Buchverf.] H. Heuer and A.F. Sanders (Eds.). *Perspectives on perception and action*. Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum Associates, 1987.
- NHTSA. 2002.** *Statement of Principles, Criteria and Verification Procedures on Driver Interactions with Advanced In-Vehicle Information and Communication Systems*. Driver Focus-Telematics Working Group. s.l. : U.S. National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), 2002.
- . **2006.** *The Impact of Driver Inattention On Near-Crash/Crash Risk*. National Highway Traffic Safety Administration, U.S. Department of Transportation. Springfield, Virginia : National Technical Information Service, 2006. DOT HS 810 594.
- Nilsson, L. 1995.** Safety effects of adaptive cruise control in critical traffic situations. *Proceedings of the IEEE 2nd World Congress on Intelligent Transportation Systems (ITS)*. 1995.
- Nunes, L., Recarte M. A. 2002.** Cognitive demands of hands-free-phone conversation while driving. *Transportation Research Part F 5*. 2002, S. 133-144.
- Olsson, S., Burns, P.C. 2000.** *Measuring Driver Visual Distraction with a Peripheral Detection Task*. Linköping University, Sweden : Department of Education & Psychology, 2000.
- Penka, A. 2001.** *Vergleichende Untersuchung zu Fahrerassistenzsystemen mit unterschiedlichen aktiven Bedienelementen*. s.l. : Herbert Utz Verlag, 2001. ISBN-13: 978-3831600977.
- Petersson, L., Fletcher, L. & Zelinsky, A. 2005.** A framework for driver-in-the-loop driver assistance systems. *Proceedings of the 8th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, September 13-16, 2005*. Vienna, Austria : s.n., 2005, S. 771-776.

- Pilutti, T. & Ulsoy, A. G. 1999.** Identification of Driver State for Lane-Keeping Tasks. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*. 29, 1999, 5, S. 486-502.
- **1997.** Identification of Driver State for Lane-Keeping Tasks: Experimental Results. *Proceedings of the American Control Conference*. 1997, S. 3370-3374.
- Pilutti, T. & Ulsoy, G. 1995.** On-Line Identification of Driver State for Lane-Keeping Tasks. *Proceedings of the American Control Conference*. 1995, S. 678-681.
- Pohl, J., Birk W. & Westervall, L. 2007.** A driver-distraction-based lane-keeping assistance system. *J. Systems and Control Engineering*. 221, 2007, Bd. 1, JSCE218, S. 541-552.
- Posner, M. I., Snyder, C. R. R., Davidson, B. J. 1980.** Attention and the detection of signals. *Journal of Experimental Psychology: General*. 1980, Bd. 109, S. 160-174.
- Posner, M.I. & Rafal, R.D. 1987.** Cognitive theories of attention and the rehabilitation of attentional deficits. *Neuropsychological Rehabilitations*. 1987, S. 182-201.
- Ranney, T.A., Mazzae, E., Garrott, R. & Goodman, M.J. 2000.** NHTSA Driver Distraction Research: Past, Present, and Future. [Online] 2000. <http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/departments/nrd-13/driver-distraction/PDF/233.pdf>.
- Rantanen, E. M., Goldberg, J. H. 1999.** *The effect of mental workload on the visual field size and shape*. *Ergonomics* 42:6 : Taylor & Francis, 1999. S. 819-834.
- Recarte, M. A., Nunes, L. M. 2000.** Effects of Verbal and Spatial-Imagery Tasks on Eye Fixations While Driving. *Journal of Experimental Psychology: Applied*. 6, 2000, Bd. 1, S. 31-43.
- Recarte, M. A., Nunes, L.M. 2003.** Mental Workload While Driving: Effects on Visual Search, Discrimination, and Decision Making. *Journal of Experimental Psychology: Applied*. Vol. 9, 2003, No. 2, S. 119-137.
- Reichart, G. 2008.** *Situationsbewusstsein - ein Konstrukt im Spannungsfeld von Intention, Erfahrung und Wahrnehmung*. Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt). Bergisch Gladbach : s.n., 2008. [http://www.bast.de/cln\\_007/nn\\_42256/sid\\_E6238B812BC596F2A9D0E1DD3E757F4A/DE/Publikationen/Downloads/unterseiten/symposium-situationsbewusstsein.html?\\_\\_nnn=true](http://www.bast.de/cln_007/nn_42256/sid_E6238B812BC596F2A9D0E1DD3E757F4A/DE/Publikationen/Downloads/unterseiten/symposium-situationsbewusstsein.html?__nnn=true).
- Rimini-Doering, M., Manstetten, D., Altmueller, T., Ladstaetter, U. & Mahler, M. 2001.** Monitoring Driver Drowsiness and Stress in a Driving Simulator. *Proceedings of International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*. 2001.
- Rockwell, T. H. 1988.** Spare Visual Capacity in Driving – Revisited: New Empirical Results for an Old Idea. [Buchverf.] M. H. Freeman, C. M. Haslegrave, P. Smith, S. P. Taylor A. G. Gale. *Vision in Vehicles II*. Amsterdam : North Holland Press, 1988, S. 317-324.
- Rockwell, T. 1972.** Skills, judgement and information acquisition in driving. [Buchverf.] T. W. Forbes. *Human factors in highway traffic safety research*. New York : Wiley, 1972.

- Rötting, M. 1999.** Methoden zur Registrierung von Augenbewegungen. [Buchverf.] M. Rötting & K. Seifert. *Blickbewegungen in der Mensch-Maschine-Systemtechnik*. Sinzheim : Pro Universitate Verlag, 1999.
- Sagberg, F., Fosser, S. & Saetermo, I.-A. F. 1997.** An Investigation of Behavioural Adaption to Airbags and Antilock Brakes among Taxi Drivers. *Accident Analysis and Prevention*. 29, 1997, Bd. 3, S. 293 - 302.
- Salvucci, D. D., Boer, E. R., Liu, A. 2001.** *Toward an integrated model of driver behavior in a cognitive architecture*. s.l. : Transportation Research Record, 2001. 1779.
- Santana Díaz, A., Jammes, B., Esteve, D. & González Mendoza, M. 2002.** Driver hypovigilance diagnosis using wavelets and statistical analysis. *Proceedings: The IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Systems*. 2002, S. 162-167.
- Saupe, S. 2005.** *Kalibrierung eines Fahrerassistenzsystems im Kundendienst*. Diplomarbeit, unveröffentlicht : Westsächsische Hochschule Zwickau, 2005.
- Saurat, D. 2007.** *Entwicklung und Validierung einer Fahreraufmerksamkeitsbewertung zur Nutzung in einem Spurhalteassistenten System*. s.l.: TU München & Audi AG, 2007. Diplomarbeit - unveröffentlicht.
- Schichtl, R. 2007.** *Fahreradaptive Auslegung eines Assistenzsystems am Beispiel eines abstandsgeregelten Tempomaten*. Ingolstadt : AUDI AG, 2007. Diplomarbeit - unveröffentlicht.
- Schmidtke, H. 1993.** Arbeitsplatzgestaltung (Abschnitt 6.5). [Buchverf.] H., Bernotat R. Schmidtke. *Ergonomie*. München : Hanser, 1993.
- Schmitt, J. & Färber, B. 2005.** Verbesserung von FAS durch Fahrerabsichtserkennung mit Fuzzy Logic. *Fahrer im 21. Jahrhundert*. VDI-Berichte, 2005, Bd. 1919, S. 177-186.
- Schnörer, T. 2004.** *Optimierung von Parametern für das Fahrerassistenzsystem Lane Departure Warning*. Diplomarbeit, unveröffentlicht : Georg-Simon-Ohm Fachhochschule Nürnberg, 2004.
- Schweigert, M. 2003.** *Fahrerblickverhalten und Nebenaufgaben*. Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München : Dissertation, 2003.
- Seeing Machines. 2008.** Driver State Sensor. [Online] Seeing Machines, 2008. <http://www.seeingmachines.com/DSS.html>.
- **2008.** Face Lab 4. [Online] Seeing Machines, 2008. <http://www.seeingmachines.com/facelab.htm>.
- Simons, Daniel J. & Chabris, Christopher F. 1999.** Gorilla in our midst: sustained inattentive blindness for dynamic events. *Perception*. 1999, 28.
- SMI - SensoMotoric Instruments. 2009.** 3D VOG Video-Oculography® System. [Online] Mai 2009. <http://www.smivision.com/en/eye-gaze-tracking-systems/products/3d-vog.html>.

- SR Research Ltd. 2009.** SR Research Complete Eye Tracking Solutions - EyeLink II. [Online] Mai 2009. [http://www.sr-research.com/EL\\_II.html](http://www.sr-research.com/EL_II.html).
- Statistisches Bundesamt. 2006.** *Unfallgeschehen im Straßenverkehr*. Wiesbaden : Statistisches Bundesamt, 2006. Artikelnr.: 5462401079004.
- Steele, T., Cutmore, T., James, D.A. & Rakotonirainy, A. 2004.** An investigation into peripheral physiological markers that predict monotony. *Proceedings of the 1st Policing and Education Conference*. 2004, S. 1-10.
- Summala, H., Lamble, D. & Laakso M. 1998.** Driving Experience and Perception of the Lead Car's Braking when Looking at In-Car Targets. *Accid. Anal. and Prev.* 1998, Bd. Vol. 30, No. 4, S. 401–407.
- Terkes, M. 2007.** *Fahreradaptive Auslegung von Assistenzsystemen am Beispiel von Audi Lane Assist*. Diplomarbeit - unveröffentlicht : AUDI AG, 2007.
- The Auto Channel. 2006.** The Auto Channel. [Online] August 2006. <http://www.theautochannel.com/news/2006/08/26/019936.2-lg.jpg>.
- Theofanou, D. 2002.** *Maße zur Erfassung von visueller Ablenkung bei verschiedenen komplexen Streckenabschnitten*. Universität Regensburg : Dissertation, 2002.
- Tijerina, L. 2000.** Issues in the Evaluation of Driver Distraction Associated with In-Vehicle Information and Telecommunications Systems. [Online] 2000. <http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/departments/nrd-13/driver-distraction/PDF/3.pdf>.
- Tijerina, L., Parmer, E. B. & Goodman, M. J. 2000.** Driver Workload Assessment of Route Guidance System Destination Entry While Driving: A Test Track Study. [Online] 2000. <http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/departments/nrd-13/driver-distraction/PDF/10.pdf>.
- Toaka, G. T. 1990.** Duration of Drivers' Glances at Mirrors and Displays. *ITE Journal*. 1990, 60, S. 35-39.
- Trefflich, B., Mayer, S. & Mack, T. 2007.** Nutzung eines videogestützten Driver Monitoring Systems zur Erkennung von Kopfgesten. [Hrsg.] VDI. *Konferenzband zu: VDI-Konferenz - Fahrer im 21. Jahrhundert*. 2007, Bde. VDI-Berichte Nr. 2015, S. 205 - 218.
- Trefflich, B., Mottok, J. & Schichtl, R. 2008b.** Fahreradaptives ACC – Adaption von ACC Warnungen an die Fahreraufmerksamkeit. *Konferenzband zu: 24. VDI/VW-Gemeinschaftstagung 2008 - Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme*. 2008b, Bde. VDI-Berichte Nr. 2048, S. 371-385.
- Trefflich, B., Reinhardt, Ch. & Lettau, P. 2008.** Ein Bewertungsverfahren zur Bestimmung von Genauigkeit und Erfassungsbereich kamerabasierter Fahrerbeobachtungssysteme. *Konferenzband zu: VDI-Konferenz - Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik*. 2008, Bde. VDI-Berichte Nr. 2038, S. 169-180.

- Trefflich, B., Schichtl, R. & Mottok, J. 2008a.** Fahreradaptives ACC - Adaption von ACC-Warnungen an die Fahreraufmerksamkeit. *Hanser Automotive*. 3-4, 2008a, Jahrgang 7, S. 20-23.
- Underwood, G., Chapman, P. Berger, Z., Crundall, D. 2003.** Driving experience, attentional focusing, and the recall of recently inspected events. *Transportation Research F, Psychology and Behaviour*. 2003, Bd. 6, S. 289-304.
- Victor, T., Blomberg, O., & Zelinsky, A. 2001.** Automating Driver Visual Behavior Measurement. [Buchverf.] A. G. Gale et al. *Vision in Vehicles 9*. s.l. : Elsevier Science , 2001.
- Weller, G. & Schlag, B. 2004.** Verhaltensadaption nach Einführung von Fahrerassistenzsystemen: Vorstellung eines Modells und Ergebnisse einer Expertenbefragung. [Buchverf.] B. Schlag. *Verkehrspsychologie - Mobilität - Sicherheit - Fahrerassistenz*. Lengerich : Pabst Science Publishers, 2004, S. 351-370.
- Wickens, C. D. 1984.** Processing resources in attention, dual task performance, and workload assessment. [Buchverf.] R. Parasuraman & D. R. Davies. *Varieties of Attention*. New York : Academic Press, 1984, S. 63-102.
- **1992.** *Engineering Psychology and Human Performance*. 2nd. New York : Harper Collins, 1992.
- Wierwille, W. W. & Tijerina, L. 1997.** Darstellung des Zusammenhangs zwischen der visuellen Beanspruchung des Fahrers im Fahrzeug und dem Eintreten eines Unfalls. *Zeitschrift für Verkehrssicherheit*. 1997, 43, S. 67-74.
- **1995.** Eine Analyse von Unfallberichten als ein Mittel zur Bestimmung von Problemen, die durch die Verteilung der visuellen Aufmerksamkeit und der visuellen Belastung innerhalb des Fahrzeugs verursacht werden. *Zeitschrift für Verkehrssicherheit*. 1995, 41, S. 164-168.
- Wierwille, W. W., Antin, J. F., Dingus, T. A. & Hulse, M. C. 1988.** Visual attentional demand of an in-car navigation display system. [Buchverf.] M. H. Freeman, C. M. Haslegrave, P. Smith, S. P. Taylor A. G. Gale. *Vision in Vehicles II*. Amsterdam : North Holland Press, 1988, S. 307-316.
- Williams, L. J. 1995.** Peripheral Target Recognition and Visual Field Narrowing in Aviators and Nonaviators. *International Journal of Aviation Psychology*. 5:2, 1995, S. 215 — 232.
- Wolf, H., Bubb, H. 2000.** Ergonomie in der Fahrwerksentwicklung - Wo und wie kann sie dort hilfreich sein? [Online] 2000. [http://www.ergonomie.tum.de/~wolf/Kommentar\\_zu\\_Folien.pdf](http://www.ergonomie.tum.de/~wolf/Kommentar_zu_Folien.pdf).
- Zhang, H., Smith, M. & Dufour, R. 2008.** *A Final Report of SAFETY VEHICLES using adaptive Interface Technology (Phase II: Task 7C): Visual Distraction*. s.l. : SAVE-IT Project, 2008.
- Zhang, H., Smith, M. 2004.** *A Final Report of SAFETY VEHICLES using adaptive Interface Technology (Phase I: Task 7): Visual Distraction Research*. s.l. : SAVE-IT Program, 2004.
- Zimmermann, A. 2002.** *Algorithmenentwicklung für Fahrerassistenzsystem zur Querführungsunterstützung*. Diplomarbeit, unveröffentlicht : Fachhochschule München, 2002.

**Zwahlen, H. T., Adams, C.C. Jr. & DeBald, D. P. 1988.** Safety aspects of CRT touch panel controls in automobiles. [Buchverf.] M. H. Freeman, C. M. Haslegrave, P. Smith, S. P. Taylor A. G. Gale. *Vision in Vehicles II*. Amsterdam : North Holland Press, 1988, S. 335-344.



# Thesen zur Dissertation

## *„Videogestützte Überwachung der Fahreraufmerksamkeit und Adaption von Fahrerassistenzsystemen“*

von

**Dipl.-Ing. Benjamin Trefflich**

1. Die Berücksichtigung der Fahreraufmerksamkeit in den Warnstrategien von Fahrerassistenzsystemen (FAS) liefert einen entscheidenden Beitrag zur Verbesserung der Verkehrssicherheit.
2. Bei dem Führen eines Fahrzeuges kommt dem visuellen Sinneskanal die größte Bedeutung zu.
3. Die Blickrichtung als auch die Kopforientierung des Fahrers sind Parameter, auf deren Grundlage auf den aktuellen Aufmerksamkeitsfokus bzw. die Ablenkung des Fahrers geschlossen werden kann.
4. Der kurzfristige Aufmerksamkeitszustand eines Fahrers kann im Zusammenhang mit der Erledigung der Fahraufgabe anhand der Begriffe „Geteilte Aufmerksamkeit“ und „Selektive Aufmerksamkeit“ aus der angewandten Psychologie beschrieben werden.
5. Die Kopforientierung des Fahrers kann unter Verwendung von Kamerasystemen im Fahrzeug ohne Einschränkung des Alltagsnutzens ermittelt werden.

6. Ein Vorziehen von FAS Warnungen bei abgelenktem Fahrer in kritischen Situationen führt zu einer frühzeitigeren Fahrerreaktion und damit zu einer Verbesserung der Verkehrssicherheit.
7. Mit Hilfe eines Laser Trackers als Referenzsensorik lassen sich kamerabasierte Fahrerbeobachtungssysteme sinnvoll im Hinblick auf die Genauigkeit der gelieferten Messwerte und bezüglich des zuverlässig erreichbaren Erfassungsbereiches beurteilen.
8. Die Kopforientierung von Fahrern während des Fahrens eines PKWs ist unabhängig vom jeweils befahrenen Straßentyp und weist keine signifikanten interindividuellen Unterschiede auf.
9. Der Differenzvektor zwischen der Blickrichtung und dem Gesichtsnormalenvektor ist stark vom Blickort innerhalb des menschlichen Blickfeldes abhängig und weist markante interindividuelle Unterschiede auf.
10. Auf der Grundlage der Kopforientierung des Fahrers kann unter Verwendung eines Klassifikators, basierend auf einer „Aufmerksamkeitsregion“, eine grobe Einschätzung getroffen werden, ob der Fahrer gerade visuell abgelenkt ist oder nicht.



# Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet.

Bei der Auswahl und Auswertung folgenden Materials haben mir die nachstehend aufgeführten Personen in der jeweils beschriebenen Weise unentgeltlich geholfen:

1. Dipl.-Psych. Christoph Blaschke – Planung, Durchführung und Auswertung der Versuchsreihe in Kapitel 5
2. Dipl.-Ing. Christian Reinhardt – Planung, Durchführung und Auswertung der Versuchsreihe in Kapitel 4
3. Dipl.-Ing. Rainer Schichtl – Planung, Durchführung und Auswertung der Versuchsreihe in Kapitel 7.1
4. Dipl.-Ing. Mehmet Terkes – Planung, Durchführung und Auswertung der Versuchsreihe in Kapitel 7.2

Weitere Personen waren an der inhaltlich-materiellen Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich hierfür nicht die entgeltliche Hilfe von Vermittlungs- bzw. Beratungsdiensten (Promotionsberater oder anderer Personen) in Anspruch genommen. Niemand hat von mir unmittelbar oder mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalte der vorgelegten Dissertation stehen.

Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ich bin darauf hingewiesen worden, dass die Unrichtigkeit der vorstehenden Erklärung als Täuschungsversuch angesehen wird und den erfolglosen Abbruch des Promotionsverfahrens zu Folge hat.

Ingolstadt, 09. Juni 2009

Benjamin Trefflich