



TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN  
Institut für Informatik



# Mensch-Maschine-Interaktionskonzepte für Fahrerassistenzsysteme im Kreuzungsbereich

Stephan Thoma





# Mensch-Maschine-Interaktionskonzepte für Fahrerassistenzsysteme im Kreuzungsbereich

Stephan Thoma

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

Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Alfons Kemper, Ph.D.

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Gudrun J. Klinker, Ph.D.  
2. Univ.-Prof. Dr. Heiner Bubb, i.R.

Die Dissertation wurde am 12.10.2009 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Informatik am 08.03.2010 angenommen.



*Meinem Großvater Alfred Zeitler*



## **Kurzfassung**

Zukünftige Fahrerassistenzsysteme zielen darauf ab, die Sicherheit für Fahrer, Passagiere und Fußgänger insbesondere im Kreuzungsbereich zu erhöhen. Eine erfolgreiche Umsetzung setzt auf den Fahrer zugeschnittene Interaktionskonzepte voraus. Die Frage, welche Zusatzinformationen eine Warnmeldung im Fahrzeug transportieren sollte, stellt einen Schwerpunkt der Arbeit dar. In Fahrsimulatorexperimenten werden die Auswirkungen von generischen im Vergleich zu systemspezifischen visuellen Warnungen untersucht. Darüber hinaus wird der Nutzen von gerichteten akustischen Warnmeldungen in unterschiedlichen Unfallszenarien quantifiziert. Der Komfortgewinn für den Fahrer ist neben dem Sicherheitsvorteil ein weiteres Argument für den Einsatz von Fahrerassistenzsystemen. Im Rahmen dieser Arbeit werden verschiedene Konzepte für die Empfehlung einer optimalen Geschwindigkeit während der Annäherung an eine Ampel verglichen.

## **Abstract**

Future Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) aim at increasing the safety of drivers, passengers and pedestrians, especially at intersections. Successful implementation requires optimal human machine interaction concepts. This thesis focuses on the question how much additional information an in-vehicle warning should carry. In driving simulator experiments, the effect of generic visual warnings in comparison to system-specific visual warnings was evaluated. In addition, the benefit of spatial audio warnings is quantified for various accident scenarios. Besides the safety aspect, increased driving comfort is an additional motivation for the deployment of ADAS. In this thesis, different concepts for in-vehicle speed recommendations during traffic light approach are evaluated.





## Danksagung

Bei meinem Quereinstieg von der Informatik in das Thema der Mensch-Maschine-Interaktion im Fahrzeug haben mich in den letzten Jahren viele Menschen begleitet, gefördert und unterstützt. Mit ihnen zusammen habe ich das ein oder andere Motivations-Tief überwunden, gute Ideen entwickelt und die Fahrsimulation an die Grenzen der Leistungsfähigkeit gebracht. Vielen Dank! Ich werde die Zeit vermissen!

Mein besonderer Dank gilt Frau Prof. Gudrun Klinker, die sich sehr viel Zeit für die Betreuung genommen hat und mit den richtigen Fragen und guten Anregungen zum Gelingen der Arbeit beigetragen hat.

Prof. Heiner Bubb danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Besonderer Dank geht auch an Thomas Lindberg für die ausdauernde Betreuung der Arbeit bei der BMW Group Forschung und Technik. Die vielen Diskussionen um die zentralen Fragen der Fahrerassistenz und das einzig wahre Versuchsdesign haben die Arbeit wesentlich beeinflusst.

Dank geht auch an Dr. Dirk Wisselmann für die Möglichkeit diese Arbeit in seiner Abteilung zu schreiben und an Prof. Klaus Bengler für die Unterstützung des Themas innerhalb seiner Gruppe.

Für die kompetente und verlässliche Unterstützung bei der Durchführung der Fahrsimulationsversuche danke ich Tamara Lorenz, Lars Tönert und Oliver Nicko.

Ich möchte mich auch bei meinen Kollegen bedanken, die meine Zeit bei der BMW Group Forschung und Technik sehr bereichert haben: Marc Breisinger, Dr. Verena Broy, Ralf Decke, Dr. Dirk Ehmanns, Mehdi Farid, Johannes Fenk, Stefan Graf, Dr. Stefan Hoch, Matthias Hopstock, Dr. Felix Klanner, Gwendolin Knappe, Thomas Lindberg, Natasa Milicic, Dr. Antje Neve, Nadine Perera, Mariana Rakic und Wolfgang Spiessl.

Kein Simulationsversuch ohne die Experten der Fahrsimulation bei BMW. Vielen Dank an Dr. Alexander Huesmann, Martin Strobl, Stefan Hofmann, Svenja Paradies, Josef Nauderer und Toni Haslbeck sowie Peter Göb von der Firma Philosys. Sie alle waren wesentliche Voraussetzung für eine reibungslose Durchführung meiner Experimente.

Fürs Korrekturlesen bedanke ich mich bei Nadine Perera, Thomas Lindberg und Dr. Klaus Bengler.

Ich danke meinen Eltern Theresa und Josef für ihre Unterstützung.

Meiner Freundin Nadine danke ich dafür, dass sie mir den nötigen Rückhalt gegeben, mich regelmäßig mit den weltbesten Kuchen<sup>1</sup> versorgt und immer wieder zum Schreiben motiviert hat.

---

<sup>1</sup>Rezepte auf Anfrage



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>5</b>
1.1	Sicherheits- und Komfortgewinn durch Fahrerassistenz . . . . .	6
1.2	Integrierte Fahrerassistenz als Herausforderung für zukünftige Automobile . .	8
1.3	Ziele und Lösungsansätze . . . . .	9
1.4	Aufbau der Arbeit . . . . .	11
<b>2</b>	<b>Grundlagen und Stand der Technik</b>	<b>13</b>
2.1	Das System Fahrer–Fahrzeug–Umfeld . . . . .	13
2.2	Modellierung der Fahraufgabe . . . . .	14
2.3	Die Rolle der Fahrerassistenz . . . . .	17
2.3.1	Assistenz versus Automation . . . . .	18
2.3.2	Assistiertes Fahren . . . . .	21
2.3.3	Die Phasen eines Unfalls . . . . .	22
2.4	Prinzipieller Aufbau von Fahrerassistenzsystemen . . . . .	24
2.5	Unfalltypen im Kreuzungsbereich und entsprechende Assistenzsysteme . . .	24
2.5.1	Stopperschildmissachtung . . . . .	27
2.5.2	Rotlichtmissachtung und Geschwindigkeitsempfehlungen . . . . .	28
2.5.3	Linksabbiegen . . . . .	29
2.5.4	Einbiegen und Queren . . . . .	29
2.5.5	Fußgänger und Fahrradfahrer . . . . .	30
2.6	Aufbau und Erweiterung der BMW Fahrsimulation . . . . .	32
2.6.1	Vereinfachung des MMI-Entwicklungsprozesses . . . . .	32
2.6.2	Verbesserung der Anbindung an Fahrsimulation und Versuchsträger . .	35
<b>3</b>	<b>Mensch-Maschine-Schnittstellen für Fahrerassistenzsysteme</b>	<b>39</b>
3.1	Warnende Fahrerassistenz . . . . .	39
3.1.1	Bestandteile einer Warnmeldung . . . . .	40
3.1.2	Subjektive Risikobewertung . . . . .	42
3.1.3	Mögliche Fehlfunktionen und deren Auswirkungen . . . . .	42
3.1.4	Ausgabemodalitäten . . . . .	44
3.1.5	Interferenz von Warnmeldungen . . . . .	47
3.1.6	Integration von Warnmeldungen . . . . .	48
3.2	Informierende Fahrerassistenz . . . . .	51
3.2.1	Visuelle Rückmeldungen . . . . .	51
3.2.2	Haptische Rückmeldungen . . . . .	53

<b>4</b>	<b>Reduktion des Informationsgehalts visueller Warnungen</b>	<b>57</b>
4.1	Motivation der Versuchsmethodik . . . . .	60
4.2	Konzeption der Warnsymbole . . . . .	61
4.3	Untersuchungen zum Verständnis von generischen Warnungen . . . . .	61
4.3.1	Versuchsbeschreibung . . . . .	62
4.3.2	Versuchsplan . . . . .	64
4.3.3	Stichprobe . . . . .	66
4.3.4	Ergebnisse . . . . .	67
4.4	Untersuchungen zur Reaktion auf generische Warnungen . . . . .	70
4.4.1	Versuchsbeschreibung . . . . .	70
4.4.2	Versuchsplan . . . . .	72
4.4.3	Stichprobe . . . . .	74
4.4.4	Ergebnisse . . . . .	74
4.5	Fazit & Diskussion . . . . .	75
<b>5</b>	<b>Nutzung des räumlichen Hörens für akustische Warnungen</b>	<b>79</b>
5.1	Abschätzung des Effekts einer gerichteten Warnung im Laborexperiment . . . . .	80
5.1.1	Versuchsbeschreibung . . . . .	80
5.1.2	Versuchsplan und Versuchsablauf . . . . .	82
5.1.3	Stichprobe . . . . .	83
5.1.4	Ergebnisse . . . . .	84
5.1.5	Diskussion . . . . .	85
5.2	Nachweis des Effekts im Fahrsimulationsversuch . . . . .	86
5.2.1	Versuchsbeschreibung und Versuchsablauf . . . . .	86
5.2.2	Versuchsplan . . . . .	89
5.2.3	Stichprobe . . . . .	90
5.2.4	Ergebnisse . . . . .	90
5.3	Fazit & Diskussion . . . . .	94
<b>6</b>	<b>Optimierung von Geschwindigkeitsempfehlungen an Lichtsignalanlagen</b>	<b>97</b>
6.1	Bekannte Konzepte und deren Beurteilung . . . . .	98
6.1.1	Statische <i>Grüne Welle</i> Beschilderung . . . . .	98
6.1.2	Dynamische <i>Grüne Welle</i> Beschilderung . . . . .	99
6.1.3	Individuelle Geschwindigkeitsempfehlungen im Fahrzeug . . . . .	99
6.1.4	Restzeitanzeigen an Lichtsignalanlagen . . . . .	101
6.2	Simulatorstudie zur Evaluierung verschiedener Anzeigevarianten . . . . .	103
6.2.1	Untersuchte Anzeigevarianten . . . . .	105
6.2.2	Versuchsbeschreibung . . . . .	107
6.2.3	Vergleichskriterien . . . . .	108
6.2.4	Versuchsplan . . . . .	110
6.2.5	Streckenführung und Versuchsablauf . . . . .	114
6.2.6	Technische Umsetzung und Simulatoreaufbau . . . . .	115
6.2.7	Stichprobe . . . . .	115
6.2.8	Ergebnisse . . . . .	117

6.2.9	Fazit & Diskussion . . . . .	123
6.3	Kombination mit einer aktiven Geschwindigkeitsregelung . . . . .	126
6.3.1	Anzeige- und Bedienlogik des BMW ACC Stop&Go Systems . . . . .	128
6.3.2	Anzeige- und Bedienkonzept des Gesamtsystems . . . . .	129
6.3.3	Fazit & Diskussion . . . . .	131
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>133</b>
7.1	Wissenschaftlicher Beitrag und Schlussfolgerungen . . . . .	133
7.2	Methodenbewertung . . . . .	134
7.3	Ausblick . . . . .	135
7.3.1	Integration von visuellen Warnungen . . . . .	135
7.3.2	Akustische Warnungen . . . . .	135
7.3.3	Geschwindigkeitsempfehlungen . . . . .	136
7.4	Schluss . . . . .	136
<b>A</b>	<b>Informationsgehalt von Warnmeldungen</b>	<b>137</b>
A.1	Fragebogen . . . . .	137
A.2	Situationsbeschreibungen Experiment 1 . . . . .	139
A.3	Situationsbeschreibungen Experiment 2 . . . . .	144
<b>B</b>	<b>Auditive Warnmeldungen</b>	<b>151</b>
B.1	Vorversuch . . . . .	151
B.2	Streckenführung im Hauptversuch . . . . .	153
B.3	Situationsbeschreibungen . . . . .	154
<b>C</b>	<b>Ampelassistenzversuch</b>	<b>159</b>
C.1	Fragebogen . . . . .	159
C.1.1	Demographische Daten . . . . .	159
C.1.2	Bewertung eines Einzelsystems . . . . .	162
C.1.3	Vergleichende Bewertung . . . . .	169
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>173</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>177</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>179</b>



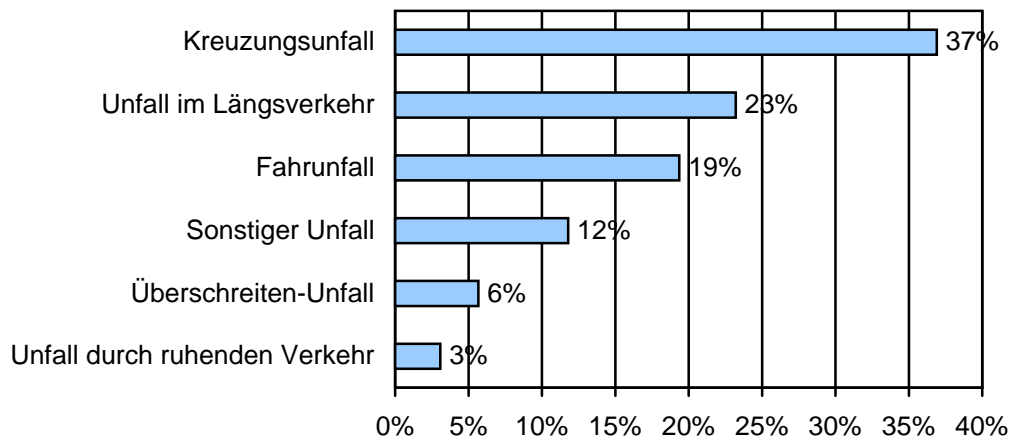
# EINLEITUNG

---

Individuelle Mobilität wird auch in Zukunft eine wichtige Voraussetzung für den wirtschaftlichen Erfolg und den Wohlstand einer Gesellschaft sein. Allerdings stehen Stadt- und Verkehrsplaner bereits heute vor der Herausforderung, einem immer größer werdenden Individualverkehr entsprechende Verkehrswege zur Verfügung zu stellen. Die Verkehrsdichte innerhalb der Stadtgrenzen wird weiter steigen: Nach Schätzungen von Burdett und Sudjic (2007) werden bis 2050 75 Prozent der Weltbevölkerung in Städten leben. Da der kleiner werdende Lebensraum immer effizienter genutzt werden muss, steigen die Anforderungen an die Verkehrsinfrastruktur sowie den einzelnen Fahrer und dessen Fahrzeug. Um gleichzeitig die Unfallzahlen selbst bei steigendem Verkehrsaufkommen weiter zu senken, ist eine Weiterentwicklung bereits existierender Maßnahmen zur aktiven und passiven Sicherheit im Automobil notwendig. Passive Sicherheitssysteme schützen bisher vor allem die Insassen des Fahrzeugs vor den Unfallfolgen. In Zukunft werden sie auch Fußgänger außerhalb des Fahrzeugs bei einem Aufprall vor schweren Verletzungen bewahren (Kühn u. a., 2007). Alle *passiven* Sicherheitssysteme haben gemeinsam, dass sie erst dann reagieren, wenn ein Unfall unvermeidlich ist oder bereits ein Aufprall stattgefunden hat. *Aktive* Sicherheitssysteme zeichnen sich hingegen durch eine vorausschauende Sensorik und ein früheres Einschreiten bei Gefahr aus. Die EU und auch nationale Regierungen fördern deshalb die Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Fahrerassistenz in unterschiedlichen Projekten. Fahrerassistenzsysteme sollen den Fahrer bei der Erfüllung seiner Fahraufgabe unterstützen und so einen großen Teil der Unfälle bereits im Vorfeld vermeiden. Dabei liegt der Fokus bisher meist auf der Weiterentwicklung der Fahrzeugsensorik und der Datenverarbeitungsalgorithmik sowie den darauf aufsetzenden Regel- und Assistenzfunktionen. Das voll autonom fahrende Auto wird zwar schon seit vielen Jahren als Zukunftsvision propagiert, ob ein solches Fahrzeug jedoch jemals die kognitiven Fähigkeiten eines Menschen ersetzen kann, erscheint nach wie vor fraglich. Alle Bestrebungen, aktive Sicherheitssysteme zu etablieren, müssen deshalb den Fahrer als wichtiges Glied in der Kette beachten und sowohl seine Stärken als auch seine Schwächen berücksichtigen.

## 1.1 Sicherheits- und Komfortgewinn durch Fahrerassistenz

Um den potenziellen Nutzen aktiver Sicherheitssysteme zu verdeutlichen, zeigt Abbildung 1.1 den prozentualen Anteil verschiedener Unfalltypen an der Gesamtanzahl aller Unfälle mit Personenschaden im Jahr 2008 in Deutschland. Ein *Fahrerunfall* liegt vor, wenn der Fahrer ohne die Einwirkung eines weiteren Beteiligten die Kontrolle über das Fahrzeug verliert. Nicht angepasste Geschwindigkeit oder eine falsche Einschätzung des Straßenverlaufs sind zwei mögliche Ursachen. Automobilhersteller haben diesen Unfalltyp als einen der ersten durch die Entwicklung aktiver Sicherheitssysteme adressiert. Den Anfang markierte die Einführung des ABS (Antiblockiersystem), das die Fahrzeugstabilität auch während extremen Bremsmanövern gewährleistet. Später kamen aufwändigere Regelsysteme hinzu, die ein gezieltes Abbremsen einzelner Räder erlauben und so die Manövrierbarkeit des Fahrzeugs weiter verbessern. Vermarktet unter verschiedenen Bezeichnungen wie DSC (Dynamic Stability Control) oder ESP (Electronic Stability Control) sind mittlerweile bereits 64% aller PKW Modellreihen auf dem deutschen Markt serienmäßig mit Systemen dieser Kategorie ausgestattet (Gutberlet, 2008). Analysen der Unfallforschung der Versicherer ergaben, dass ESP in 25% aller Unfälle mit Personenschaden einen positiven Einfluss auf den Unfallhergang hätte (Hummel und Kühn, 2007). Da solche Systeme schneller und besser als der durchschnittliche Fahrer reagieren und Entscheidungen treffen können, beschränkt sich die Interaktion meist auf eine Anzeige des aktuellen Systemzustands und auf die Möglichkeit bestimmte Funktionen in besonderen Situationen abzuschalten (z.B. Anfahren auf eisglatter Fahrbahn).



**Abbildung 1.1:** Nach Unfalltypen aufgeschlüsselte Verteilung der 320614 Unfälle mit Personenschaden im deutschen Straßenverkehr im Jahre 2008 (Statistisches Bundesamt, 2008)

Ein *Unfall im Längsverkehr* ist nach den Daten des statistischen Bundesamts der zweithäufigste Unfall mit Personenschaden im Straßenverkehr und umfasst alle Konflikte zwischen



Fahrzeugen, die sich in die gleiche Richtung oder entgegengesetzte Richtungen bewegen, sofern kein anderer Unfalltyp zutreffend ist. Ein typisches und häufiges Beispiel ist der Auffahrunfall. Diesen zu verhindern versuchen Fahrzeughersteller zunächst mit der Unterstützung bzw. Verstärkung einer Fahrer-initiierten Bremsreaktion oder der Ausgabe einer Warnung. In letzter Konsequenz ist das Ziel, den Unfall durch eine autonom ausgelöste Bremsreaktion zu verhindern. Zusammen mit Systemen zur Vermeidung von Kollisionen beim Spurwechsel bildet diese Systemklasse eine wichtige Basis zur Reduzierung der Unfallzahlen im Längsverkehr. Vor allem bei der Ausgabe von Warnungen oder dem direkten Eingriff in das Geschwindigkeitsverhalten tritt das System in den Kompetenzbereich des Fahrers ein. Denn ein Fahrer ist durchaus in der Lage, Auffahrunfälle zu verhindern. Um eine subjektive Bevormundung durch das System auszuschließen, gilt es sehr genau zu prüfen, ob ein Eingriff in der jeweiligen Situation gerechtfertigt ist. Eine Berücksichtigung des Fahrerverhaltens und -zustandes ist dabei obligatorisch. Dies gestaltet sich teilweise schwierig, da Fahrer häufig die objektiven Grenzen des sicheren Fahrens – zumindest für kurze Zeit – bewusst überschreiten. Popiv u. a. (2008) untersuchen das natürliche Fahrverhalten bei Spurwechseln auf Autobahnen und stellen dabei eine kritische Unterschreitung des Sicherheitsabstands zum Vordermann in 40% der Fälle fest.

Die meisten Unfälle mit Personenschaden ereignen sich im Kreuzungsbereich. Für die Grafik sind die beiden, in der Unfallstatistik getrennt ausgewiesenen, Unfalltypen *Abbiege-Unfall* und *Einbiegen/Kreuzen-Unfall* zusammengefasst. Sicherheitssysteme für den Kreuzungsbereich haben offenbar ein großes Potenzial, doch stellen sie gleichzeitig auch die höchsten Anforderungen an die Umfelderkennung und -analyse. Denn die hohen Unfallzahlen sind auch ein Indikator dafür, dass Fahrer hier tendenziell öfter als in anderen Verkehrssituationen überfordert sind oder Fehler begehen. Ebenfalls schwierig ist eine Abschätzung, wie viele Unfälle mit einem System verhindert werden können, da dies von zahlreichen Faktoren abhängt. Nichtsdestotrotz bildeten Kreuzungsassistenzsysteme in den letzten Jahren in verschiedenen Forschungsprojekten<sup>1</sup> einen deutlichen Schwerpunkt. Das Feld teilt sich in Systeme zur Vermeidung von Regelverstößen (z.B. Überfahren einer roten Ampel) und Systeme zur Verhinderung von Kollisionen im Kreuzungsbereich. Dazu gehören Kollisionen mit anderen Fahrzeugen sowie mit verletzlichen Verkehrsteilnehmern wie Motorradfahrern, Fahrradfahrern und Fußgängern. Eine Antwort auf die Frage nach dem optimalen Unterstützungsgrad und der Anpassung an das Fahrerverhalten ist bei der Kreuzungsassistenz besonders schwer zu finden. Ein Unfall ist bezogen auf die Kilometerleistung ein seltenes Ereignis. Den Unfallstatistiken zufolge (Statistisches Bundesamt, 2008) tritt ein Unfall im Mittel alle 300.000 Kilometer auf. Im Mittel nur etwa alle 139 Mio. zurückgelegte Kilometer verunglückt dabei eine Person tödlich. Fahrzeughersteller stehen also vor dem Problem, dass jedes aktive Sicherheitssystem möglichst viele dieser, bezogen auf die Gesamtfahrleistung, äußerst seltenen Ereignisse verhindern sollte, ohne den Fahrer im Fahralltag negativ zu beeinflussen oder zu stören.

Neben der Entwicklung neuer Sicherheitssysteme, ist auch die Verbesserung des Fahrkomforts trotz steigendem Verkehrsaufkommen ein wichtiger Aspekt. Hier ist insbesondere die

---

<sup>1</sup>z.B. INVENT, AKTIV, PReVENT

Stauassistenten sind von großem Interesse. Zum einen soll der Fahrer durch Telematikdienste besser mit Informationen versorgt werden, um das Fahren im Stau bereits im Voraus zu vermeiden, zum anderen entlastet die Übernahme der Fahrzeugführung während einer Staufahrt den Fahrer enorm. Ein hochautomatisiertes Stauassistentensystem wird beispielsweise von Lindberg u. a. (2007) dargestellt.

## **1.2 Integrierte Fahrerassistenz als Herausforderung für zukünftige Automobile**

Die Einführung neuer Fahrerassistenzsysteme bedeutet einen aufwändigen Entwicklungsprozess für die Fahrzeughersteller. Die Erarbeitung einer Spezifikation für die rein technische Umsetzung erfordert die Analyse von Unfallzahlen und detaillierten Unfallberichten. So ergeben sich die entsprechenden Anwendungsfälle des Systems und die daraus abgeleiteten Anforderungen an Sensorik und Datenverarbeitungsverfahren. Dabei steigt die Anzahl der abzudeckenden Anwendungsfälle mit zunehmender Komplexität der adressierten Verkehrssituationen. Auch wenn die Unfallstatistik die Möglichkeit einer klaren Einteilung in verschiedenen Unfalltypen suggeriert, so ist doch jeder Unfall individuell verschieden. Es sind unter anderem unterschiedliche Straßengeometrien und auch verschiedene Fahrstile von Bedeutung.

Unter Berücksichtigung ergonomischer Randbedingungen sind darauf aufbauend geeignete Konzepte zur Mensch-Maschine-Interaktion zu entwickeln. Dabei ist festzulegen, ob beziehungsweise wie der Fahrer das System bedient, welche Statusrückmeldungen das System an den Fahrer ausgibt und welche Modalitäten dafür genutzt werden (visuell, auditiv, ...). Das gewählte Mensch-Maschine-Interaktionskonzept muss dann seine Tauglichkeit für die angestrebten Anwendungsfälle in Probandenversuchen unter Beweis stellen.

Parallel dazu ist die Absicherung des Systems ein nicht zu vernachlässigender Aspekt. Denn mit zunehmender Verantwortungsübernahme durch das System steigt auch die Anforderung an die Zuverlässigkeit, Beherrschbarkeit, Verständlichkeit und Vorhersagbarkeit des Systems (Schwarz, 2006). Gleichzeitig muss Missbrauch ausgeschlossen werden.

Die Integration mehrerer Assistenzsysteme in einem Fahrzeug erhöht den Aufwand weiter. Zunächst muss eine Kopplung auf technischer Ebene erfolgen. Dies umfasst die gemeinsame Nutzung der Sensorik und die Implementierung auf entsprechenden Steuergeräten im Fahrzeug. Bereits hier ist es wichtig, ungewollte Nebeneffekte und gegenseitige Beeinflussung der Systeme zu vermeiden. Bei vielen Assistenzsystemen wird es aufgrund komplexer Anwendungsfälle in absehbarer Zeit keine vollständige Verantwortungsübernahme durch das Fahrzeug geben können. Dies trifft insbesondere auch auf Systeme zur Unfallvermeidung im Kreuzungsbereich zu. Der positive Effekt, den einzelne Systeme in bestimmten Verkehrssituationen auf die Fahrsicherheit oder den Fahrkomfort haben, hängt also von einer erfolgreichen Kooperation mit dem Fahrer ab. Dies gilt sowohl für die Bedienung der Systeme

als auch für die Verarbeitung deren Rückmeldungen (z.B. bei der Reaktion auf eine Warnung). Meldungen, die verschiedene Assistenzsysteme ohne Abstimmung gleichzeitig oder in kurzer Abfolge ausgeben, können zu einer Verschlechterung der Fahrerreaktion führen. Dies zeigt beispielsweise eine Studie, die eine Erhöhung der Reaktionszeit auf eine Auffahrwarnung feststellt, wenn kurz davor ein Fahrzeugsystem eine Störung meldet (Lermer und Schuhmann, 2007).

## 1.3 Ziele und Lösungsansätze

Es ist zu erwarten, dass die Kreuzungsassistenz mit ihrer Fülle an neuen Funktionen die Komplexität für den Fahrer weiter erhöht. Der positive Effekt, den einzelne Systeme bisher auf die Fahrsicherheit haben oder zukünftige Systeme haben werden, bleibt bei einer Kombination mehrerer Systeme nicht zwangsläufig erhalten. Es ist deshalb Ziel dieser Arbeit, Konzepte zur Integration verschiedener Kreuzungsassistenzsysteme zu erarbeiten und Methoden aufzuzeigen, diese zu evaluieren. Der Fokus liegt dabei ausschließlich auf Fragestellungen der Mensch-Maschine-Interaktion.

Die Systeme lassen sich zwei Kategorien zuordnen: Informations- bzw. Komfortsysteme, die ein souveräneres und angenehmeres Fahren ermöglichen, und Sicherheitssysteme zur Vermeidung von Unfällen. Die Nutzung von Komfort- und Informationssystemen ist dem Fahrer freigestellt, wohingegen eine Missachtung von Rückmeldungen eines der Sicherheitssysteme mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einem Unfall führt. Die zwei Systemkategorien sind dementsprechend durch einen stark unterschiedlichen Handlungszeitraum für den Fahrer charakterisiert. Während Informations- und Komfortsysteme dem Fahrer ausreichend Zeit für die Informationsaufnahme und die Bedienung einräumen, bleiben für die Reaktion auf eine Kollisionswarnung nur wenige Sekunden. Aus diesem Grund unterscheiden sich die Ansätze zur Mensch-Maschine-Interaktion innerhalb der zwei Kategorien grundlegend und werden getrennt behandelt.

Diese Arbeit untersucht den Integrationsbedarf für Informationssysteme und erarbeitet bzw. vergleicht in diesem Rahmen Konzepte zur Darstellung von Geschwindigkeitsempfehlungen während der Annäherung an eine Verkehrsampel. Dieses Informationssystem hilft dem Fahrer eine optimale Geschwindigkeit zu wählen, sodass der Kraftstoffverbrauch im Stadtverkehr vermindert, der Fahrkomfort erhöht und die Reisezeit verkürzt wird. Gerade im Kreuzungsbereich erzeugt die Verarbeitung der Umweltreize bereits eine hohe mentale Beanspruchung des Fahrers. Es ist deshalb wichtig, die Art der Informationspräsentation so einfach wie möglich zu gestalten, ohne dabei den Nutzen des Systems zu schmälern. Die Umsetzung als Komfortsystem erfolgt dann durch eine Kombination mit einer aktiven Geschwindigkeitsregelung, die dem Fahrer die Anpassung der Geschwindigkeit in bestimmten Situationen abnimmt.

Aufgrund der komplexen Umgebungserfassung und Situationsanalyse (vgl. Kapitel 2.5) ist es für die meisten Sicherheitssysteme im Kreuzungsbereich nicht möglich, den potenziellen Unfallverlauf weit in die Zukunft mit ausreichender Sicherheit vorauszusagen. Je länger das

Assistenzsystem mit einer quantitativen Abschätzung der Gefährlichkeit einer Situation wartet, desto größer wird die Konfidenz dieser Aussage. Dies führt in letzter Konsequenz dazu, dass dem Fahrer ein immer kleiner werdendes Zeitfenster bleibt, um einen drohenden Unfall abzuwenden. Ein autonomer, vom Fahrer unabhängiger Eingriff würde dieses Problem umgehen, verlagert jedoch einen großen Teil der Verantwortung zum Assistenzsystem, was wiederum zu noch höheren Anforderungen an die Umfelderkennung und die Situationsanalyse führt. Der im Moment am sinnvollsten erscheinende Kompromiss ist der Einsatz von Warnsystemen im Fahrzeug. Der Zweck einer Warnmeldung ist zunächst, die Aufmerksamkeit des Fahrers zu erregen. Dies kann in unterschiedlichen Sinnesmodalitäten erfolgen (visuell, auditiv, haptisch). Darüber hinaus können Warnmeldungen eine Information über deren Ursprung bzw. Dringlichkeit übermitteln oder eine Handlungsempfehlung enthalten. Der Zeitpunkt der Warnung ist so gewählt, dass dem Fahrer ausreichend Zeit bleibt, die Nachricht wahrzunehmen, zu verarbeiten und geeignet zu reagieren um so den Unfall zu vermeiden. Dennoch bedeutet eine Warnung ein erhöhtes Anforderungsniveau für den Fahrer, da der Reaktionszeitraum knapp bemessen ist.

In dieser Arbeit wird die Frage beleuchtet, welchen Informationsgehalt Warnungen im Kreuzungsbereich haben sollten. Eine Reduktion des Informationsgehalts führt zu einer Vereinfachung der Mensch-Maschine-Schnittstelle und damit zu einer Verringerung der kognitiven Last, birgt jedoch gleichzeitig die Gefahr, dass der Fahrer durch fehlende Information schlechter auf Ereignisse reagieren kann. Insbesondere wird untersucht, welche Auswirkungen der Einsatz einer generischen visuellen Warnung im Gegensatz zu system-spezifischen Warnungen auf das Fahrverhalten in Konfliktsituationen hat. Es werden Evaluationsmethoden erarbeitet, die die Untersuchung einer hohen Anzahl von Warnsituationen ermöglichen. Hier besteht die größte Herausforderung in dem bereits erwähnten Verhältnis der Zahl auftretender Unfälle bezogen auf die zurückgelegten Kilometer. Denn obwohl der durchschnittliche Fahrer eine große Zahl von Kreuzungen durchfährt, ohne dabei in einen Unfall verwickelt zu sein, erfordert die Evaluierung von Warnstrategien eine statistisch ausreichende Anzahl an messbaren Ereignissen.

Während einer Kreuzungsdurchfahrt können Konflikte mit anderen Verkehrsteilnehmern in verschiedensten räumlichen Konstellationen auftreten. Wenn der Fahrer einen anderen Verkehrsteilnehmer übersieht und ein Assistenzsystem daraufhin eine Warnung ausgibt, orientiert sich der Fahrer zunächst, um den Grund für die Warnung zu erkennen. Danach entscheidet er, ob eine Handlung notwendig ist. In dieser Arbeit werden deshalb räumlich gerichtete akustische Warnmeldungen auf ihr Unfallvermeidungspotenzial hin untersucht. Da das Befahren eines Kreuzungsbereichs für den Fahrer eine überwiegend visuell geprägte Aufgabe darstellt, ist eine zusätzliche *akustische* Richtungsinformation möglicherweise vom Fahrer besser aufnehmbar als eine *visuelle*. Ziel ist es, den Nutzen einer solchen akustischen Warnung in Simulationsversuchen zu quantifizieren.

## 1.4 Aufbau der Arbeit

Kapitel 2 stellt zunächst eine grundlegende Betrachtung der Fahraufgabe aus systemergonomischen Gesichtspunkten dar. Zusammen mit dem Begriff der Automation und ihren unterschiedlichen Ausprägungen bildet das hierarchische Modell der Fahraufgabe das Raster für die Einordnung der verschiedenen Fahrerassistenzsysteme. Eine Einführung in den prinzipiellen Aufbau von Assistenzsystemen und deren Entwicklungsprozess leitet hin zur Übersicht zukünftiger Kreuzungsassistenzsysteme. Die Beschreibung der einzelnen Systeme beinhaltet dabei vor allem die für mögliche Mensch-Maschine-Interaktionskonzepte relevanten Fakten.

Da der Schwerpunkt dieser Arbeit die Entwicklung integrativer Anzeige- und Bedienkonzepte für zukünftige Fahrerassistenzsysteme ist, fasst Kapitel 3 Aspekte der Mensch-Maschine-Interaktion zusammen. Ergebnisse aus Forschungsprojekten liefern wichtige Erkenntnisse für die Präsentation von Informationen und die Ausgabe von Warnmeldungen. Gleichzeitig wird aufgezeigt, welche Fragestellungen für Interaktionskonzepte in künftigen Automobilen weiterhin bestehen und wie diesen begegnet werden kann. Es werden die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Simulatorstudien zur Klärung einzelner Sachverhalte motiviert und kurz umrissen.

Kapitel 4 widmet sich der Frage, wie viel Zusatzinformation visuelle Warnungen transportieren sollten, damit der Fahrer auf eine Warnmeldung adäquat reagieren kann. Dabei wird zunächst das Verständnis von visuellen Warnungen mit unterschiedlicher Aussagekraft für verschiedene Kreuzungsassistenzsysteme verglichen. Im zweiten Schritt wird in einem weiteren Experiment die Reaktionszeit des Fahrers in Abhängigkeit des Informationsgehalts erhoben. Beide Studien werden in Form eines Videoszenarioversuchs durchgeführt und in diesem Kapitel detailliert beschrieben.

Die Frage, ob sich das räumliche Hörvermögen des Menschen für eine richtungsgebundene Warnung vor Gefahren im Kreuzungsbereich ausnutzen lässt und in der Folge kürzere Reaktionszeiten auftreten, wird in Kapitel 5 behandelt. Auf der Basis eines Vorversuchs im Labor soll ein Fahrsimulationsexperiment, mit Hilfe ausgewählter kritischer Situationen im Kreuzungsbereich, das Potenzial abschätzen.

Die Anzeige von Geschwindigkeitsempfehlungen während der Annäherung an eine Lichtsignalanlage ist ein Beispiel für eine Darstellung zusätzlicher Informationen im Fahrzeug. Kapitel 6 sammelt zunächst bekannte Anzeigekonzepte für diesen Anwendungsfall. Anhand eines Fahrsimulatorexperiments werden dann drei ausgewählte Varianten bezüglich verschiedener Aspekte miteinander verglichen. Es werden detailliert das Versuchsdesign, die Umsetzung und die Ergebnisse erläutert.

Kapitel 7 diskutiert die erzielten Ergebnisse kritisch und ordnet diese in den Gesamtzusammenhang ein. Es findet eine abschließende Betrachtung der gewählten Untersuchungsmethoden statt.



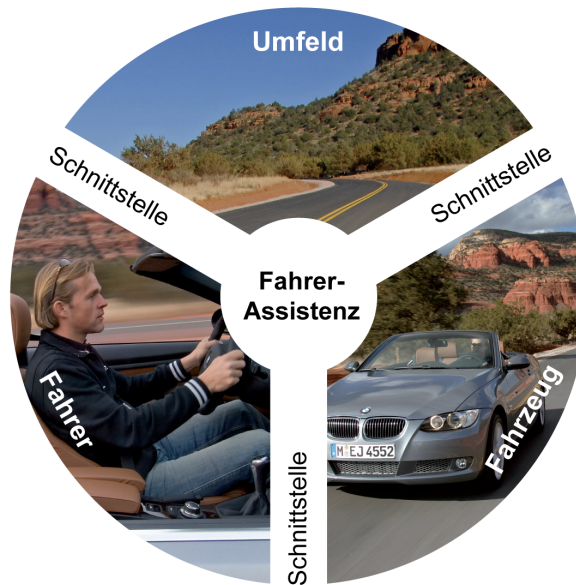
# GRUNDLAGEN UND STAND DER TECHNIK

---

Dieses Kapitel vermittelt die Grundlagen, die für das Verständnis der Funktionsweise von Fahrerassistenzsystemen im Zusammenspiel mit dem Fahrer, dem Fahrzeug und der Fahrumgebung notwendig sind. Es wird der Zusammenhang zu Fragestellungen der Automatisierung hergestellt und die Fahrerassistenz in diesen Kontext eingeordnet. Das Kapitel schließt mit einer technischen Beschreibung der für den Kreuzungsbereich relevanten Assistenzsysteme und einer Einführung in die BMW Fahrsimulation.

## 2.1 Das System Fahrer–Fahrzeug–Umfeld

Der Mensch bildet, sobald er ein Fahrzeug lenkt, zusammen mit Fahrzeug und Umfeld ein Gesamtsystem, in dem er seine Fahraufgabe erfüllt (Abbildung 2.1). Zwischen allen Teilen des Systems existieren Schnittstellen, die eine Interaktion oder einen Informationsaustausch ermöglichen. Fahrer und Fahrzeug interagieren über Mensch-Maschine-Schnittstellen, indem der Fahrer die Stellteile des Fahrzeugs bedient oder Rückmeldungen des Fahrzeugs verarbeitet. Über seine Sinnesorgane nimmt er das Umfeld wahr und beeinflusst dieses gleichzeitig durch sein Handeln. Der Fahrer besitzt verschiedene Fähigkeiten, Verhaltensweisen und Eigenschaften. Wichtige Fähigkeiten für das Führen eines Kraftfahrzeugs sind beispielsweise seine Wahrnehmungsfähigkeit und seine Reaktionsfähigkeit. Für die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen ist es wichtig die Grenzen dieser Fähigkeiten zu kennen, denn ein möglicher Ansatzpunkt für die Unterstützung des Fahrers beim Erfüllen der Fahraufgabe ist es, diese Fähigkeiten durch bestimmte Maßnahmen zu verbessern oder aber im Falle deren Überschreitung gezielt einzugreifen. Fahrerassistenzsysteme müssen mit allen drei Teilen des Systems zusammenarbeiten. Sie nehmen, wie der Fahrer, Informationen aus dem Umfeld auf



**Abbildung 2.1:** Das System Fahrer–Fahrzeug–Umfeld

und verarbeiten diese. Allerdings ist auch Wissen über den Fahrer eine notwendige Grundlage für eine erfolgreiche Zusammenarbeit zwischen Assistenzsystem und Fahrer. Ein Assistenzsystem, welches völlig unabhängig von den Bedürfnissen des Fahrers handelt, würde keine Akzeptanz finden. Mögliche Kenngrößen sind beispielsweise der momentane Ermüdungsgrad oder die Erkennung der Absicht, einen Spurwechsel durchführen zu wollen. Es ist naheliegend, dass oft keine objektive Einschätzung des Fahrerwunsches oder eine objektive Quantifizierung der von einer Verkehrssituation ausgehenden Gefahr möglich ist. Diese mögliche Diskrepanz zwischen der Situationseinschätzung eines Assistenzsystems und der des Fahrers macht eine gezielte Auslegung von Fahrerassistenzsystemen notwendig.

## 2.2 Modellierung der Fahraufgabe

Um mögliche Angriffspunkte für unterstützende Systeme aufzudecken, ist es notwendig, die Fahraufgabe in kleinere und damit besser handhabbare Teile zu zerlegen. Geiser (1985) nimmt eine Unterteilung in *primäre*, *sekundäre* und *tertiäre* Fahraufgaben vor. Die primäre Fahraufgabe umfasst alle Tätigkeiten, die notwendig sind, um mit Hilfe des Fahrzeugs das gesetzte Ziel zu erreichen. Insbesondere die Längs- und Querregelung des Fahrzeugs unter Berücksichtigung des Straßenverlaufs fällt in diese Kategorie. Die sekundären Fahraufgaben decken alle aus den primären Fahraufgaben abgeleiteten Tätigkeiten ab. Dazu gehören beispielsweise das Setzen des Blinkers oder das Schalten der Gänge. Alle übrigen, tertiären Aufgaben sind nicht direkt für das Führen eines Kraftfahrzeugs erforderlich, sondern befriedigen vielmehr das Bedürfnis des Fahrers nach Komfort und zusätzlicher Information (Radio, Telefon, etc.).



Nach Bernotat (1970) ist die primäre Fahraufgabe hierarchisch in die drei Teilaufgaben *Navigation*, *Bahnführung* und *Stabilisierung* aufgeteilt (siehe auch Abbildung 2.2).

**Navigation** Auf der Navigationsebene legt der Fahrer sein Fahrziel und eine Route durch das Straßennetz fest. Während der Fahrt muss der Fahrer alle zur Einhaltung der festgelegten Route erforderlichen Informationen wahrnehmen. Dazu gehören beispielsweise Beschilderungen und Richtungsangaben. Die Verarbeitung zusätzlicher Angaben zu Staus und Umleitungen oder auch die Korrektur von fehlerhaft ausgeführten Aktionen (z.B. falsches Abbiegen) können zu einer Anpassung der Route führen. Die Frequenz der Aufgaben auf der Navigationsebene ist gering, jedoch führen sie meist zu einer höheren mentalen Beanspruchung und damit zu einer längeren Bearbeitungsdauer. Aufgaben auf dieser Ebene können nur dann abgearbeitet werden, wenn keine Aufgaben der darunter liegenden Ebenen mentale Ressourcen erfordern. Eine Unterstützung des Fahrers auf der Navigationsebene ist beispielsweise durch Navigationssysteme möglich, die die Routenplanung und Anpassung für den Fahrer übernehmen.

**Bahnführung** Auf der Bahnführungsebene setzt der Fahrer die auf der Navigationsebene festgelegte Fahrroute unter Berücksichtigung des Straßenverlaufs und anderer Verkehrsteilnehmer in konkrete Manöver um. Dazu gehören das Einordnen in die korrekte Abbiegespur, das Durchführen eines Überholmanövers, die Beachtung von Verkehrszeichen oder die Einhaltung des Abstands zum Vordermann. Hier ist eine Unterstützung des Fahrers durch Spurverlassenswarnungen, Auffahrwarnungen oder auch durch eine automatische Abstandshaltung möglich.

**Stabilisierung** Auf der Stabilisierungsebene werden die in der Bahnführungsebene festgelegten Manöver über eine passende Bedienung von Gaspedal, Bremse und Lenkrad umgesetzt. Der Fahrer befindet sich in einem Regelkreis, in dem er Abweichungen des Fahrzeugs von der Sollspur durch geeignete Maßnahmen kompensiert. Beispiele hierfür sind das Gegenlenken bei Seitenwind oder Übersteuern sowie die Berücksichtigung vereister Fahrbahnen. Zur Unterstützung des Fahrers auf dieser Ebene kommen Fahrwerksregelsysteme wie ABS (Anti-Blockiersystem) oder ASR (Antriebsschlupfregelung) zum Einsatz. Diese sind in den meisten Extremsituationen in der Lage, schneller und besser als der Fahrer zu reagieren.

Die kognitiven Anforderungen an den Fahrer steigen von der Stabilisierungsebene über die Bahnführungsebene bis zur Navigationsebene stetig an. Dies ist vor allem mit einem Anstieg der Anzahl der möglichen Handlungsalternativen und dem Planungsaufwand auf den jeweiligen Ebenen zu begründen. Gibt es bei einem übersteuernden Fahrzeug nur wenige Handlungsalternativen, so existieren auf der Bahnführungsebene bereits unzählige Strategien zur Umsetzung der Fahrroute. Die Prioritäten der drei Ebenen sind dabei allerdings gerade anders herum verteilt. Nur wenn die Stabilisierungsaufgabe keine mentalen Ressourcen erfordert, ist eine Abarbeitung von Aufgaben auf den beiden anderen Ebenen möglich. Die

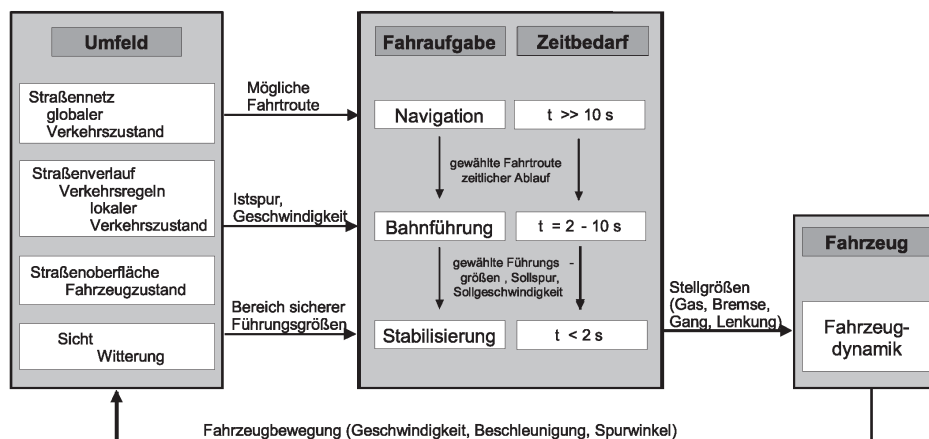


Abbildung 2.2: Drei-Ebenen-Modell der Fahraufgabe nach Bernotat (1970) aus (Deuschle, 2005)

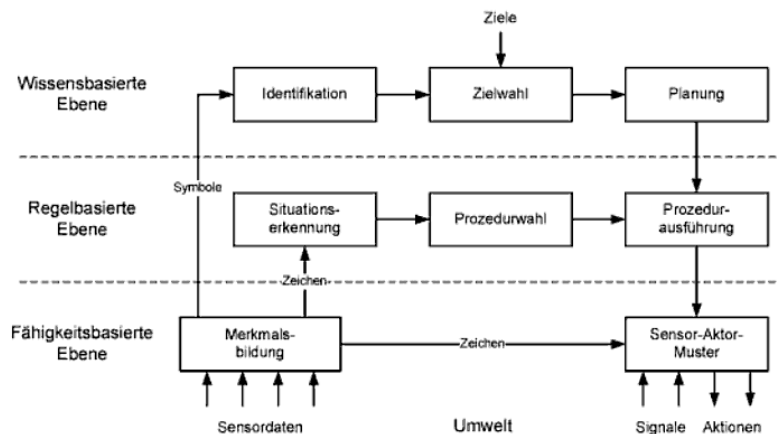


Abbildung 2.3: Menschliches Handlungsmodell nach Rasmussen (1983)

Fähigkeit des Menschen, bestimmte Handlungsabläufe durch Training in zunehmendem Maße zu automatisieren, relativiert diese Problematik. Das Handlungsmodell von Rasmussen (1983) (Abbildung 2.3) teilt das Handeln des Menschen in drei Stufen:

**Fertigkeitsbasierte Ebene** Auf dieser Ebene erfolgt die Verarbeitung der Signale und die Auswahl einer geeigneten Handlung automatisiert und unbewusst. Die mentale Beanspruchung ist deshalb gering.

**Regelbasierte Ebene** Hier versucht der Mensch die vorliegende Situation auf bekannte Probleme abzubilden. Dies geschieht durch die Auswahl einer geeigneten Prozedur und deren Abarbeitung.

**Wissensbasierte Ebene** Scheitert eine Abbildung der Situation auf bekannte Probleme, so greift der Mensch auf sein abstraktes Wissen zurück und versucht durch Analyse der

Aufgabe eine Heuristik zur Zielerreichung zu finden. Diese setzt sich dann aus verschiedenen Prozeduren zusammen, die auf der regelbasierten Ebene abgearbeitet werden können.

Wendet man das Handlungsmodell nach Rasmussen auf die Fahraufgabe an, so zeigt sich, dass die meisten Tätigkeiten auf der Stabilisierungsebene fertigungs- oder regelbasiert ablaufen. Ein geübter Fahrer denkt nicht darüber nach, welcher Gang für die momentane Situation passend ist, oder wie stark für die nächste Kurve eingelenkt werden muss. Jedoch ist im Umkehrschluss nicht jegliches Verhalten auf der Ebene der Navigation wissensbasiert. Auch hier gibt es stark trainierte Abläufe die regelbasiert ablaufen können. Beispielsweise erfordert der tägliche Weg zur Arbeit kaum wissensbasiertes Handeln.

## 2.3 Die Rolle der Fahrerassistenz

Fahrerassistenz ist keine Modeerscheinung, sondern war in jeder Fahrzeuggeneration Ausdruck technischen Fortschritts und wichtiges Unterscheidungsmerkmal zu Mitbewerbern auf dem Markt. Frühe Fahrerassistenzsysteme sind beispielsweise der Tachometer, der eine objektive Messung der gefahrenen Geschwindigkeit erlaubt, und der elektrische Starter, genannt „Damenhilfe“, der ein Betätigen der Handkurbel überflüssig macht. Dass diese Systeme heute niemand mehr als Fahrerassistenz bezeichnen würde, zeigt bereits dass dieser Begriff einem zeitlichen Wandel unterworfen ist. Über die Jahre hat die Komplexität der Systeme im Fahrzeug und auch die der Assistenzsysteme stetig zugenommen. Mussten sich einfache Assistenzsysteme noch auf wenige Informationsquellen stützen, so können heutige Systeme mit einer Vielzahl von Sensoren ihre Umgebung erfassen. Moderne Computersysteme ermöglichen die Verarbeitung großer Datenmengen, die zudem mit Unsicherheiten behaftet sind.

Mit der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen werden nach Deutschle (2005) die folgenden Ziele verfolgt:

**Erhöhung des Fahrkomforts** Durch die Übernahme lästiger und monotoner Tätigkeiten stehen dem Fahrer mentale Ressourcen für andere Aufgaben zur Verfügung.

**Steigerung der Sicherheit** Sicherheitssysteme unterstützen den Fahrer in Bereichen, in denen seine Wahrnehmungsfähigkeit eingeschränkt oder seine Entscheidungsfähigkeit der eines Systems unterlegen ist. Darüber hinaus werden Sicherheitssysteme immer dann aktiv, wenn der Fahrer eine fehlerhafte Handlung vollzieht.

**Verbesserung der Verkehrseffizienz** Durch Vernetzung mit anderen Fahrzeugen oder Verkehrsinfrastruktur können Assistenzsysteme dazu beitragen, Staus im Vorfeld zu vermeiden und so einen höheren Gesamtdurchsatz des Verkehrsnetzes erreichen.

**Schonung der Umwelt** Auf der Navigationsebene kann beispielsweise durch die gezielte Information über Staus und Baustellen eine unnötig lange Fahrzeit vermieden werden. Schaltpunktanzeigen im Fahrzeug tragen dazu bei, das Motorkennfeld besser auszunutzen und so Kraftstoff einzusparen.

### 2.3.1 Assistenz versus Automation

Unter dem Begriff der Fahrerassistenz fasst man heute ein breites Spektrum von Systemen zusammen. Einige Systeme, wie beispielsweise eine automatische Abstandshaltung (Adaptive Cruise Control), gehören jedoch nach den gängigen Definitionen in der Literatur bereits zur Klasse der automatisierten Systeme. Parasuraman und Riley (1997) definieren den Begriff der Automation folgendermaßen:

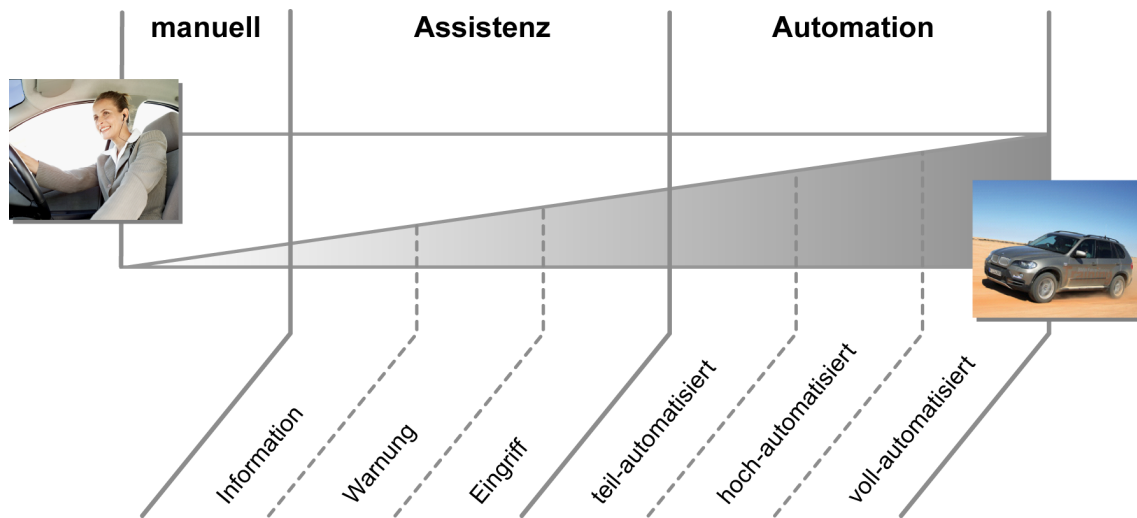
[...] We define automation as the execution by a machine agent (usually a computer) of a function that was previously carried out by a human. What is considered automation will therefore change with time. When the reallocation of a function from human to machine is complete and permanent, then the function will tend to be seen simply as a machine operation, not as automation. [...]

Abgebildet auf die automotive Domäne bedeutet Automation die Übernahme einer Tätigkeit durch das Fahrzeug, die ansonsten der Fahrer durchführen muss. Darüber hinaus ist ein gewisser Grad an Innovation oder Neuwertigkeit erforderlich, um von Automation sprechen zu können. Dies gilt ebenso für Fahrzeugfunktionen. Denn einen automatischen Anlasser würde heute niemand mehr als Fahrerassistenzsystem betrachten, obwohl die Bezeichnung zur damaligen Zeit durchaus berechtigt war.

Eine Einordnung aller bekannten Fahrerassistenzsysteme unter diese Begriffsdefinition ist allerdings schwer möglich. Denn ein Auffahrwarnsystem nimmt dem Fahrer keine Tätigkeit im Sinne einer Automation ab. Die Fahrzeugführung obliegt nach wie vor seiner Verantwortung und eine Garantie für eine fehlerlose Funktion eines Warnsystems ist ebenfalls nicht gegeben. Dementsprechend teilt sich die Menge der umgangssprachlich als Fahrerassistenzsysteme bezeichneten Systeme in reine Assistenz und Automation auf (Braess und Donges, 2006). Abbildung 2.4 verdeutlicht die Zusammenhänge grafisch.

Automatisierte Systeme unterscheiden sich im Grad der Automation sowie der durch die Automation adressierten Tätigkeitsbereiche. Übertragen auf die Fahrzeugführung unterscheiden sie sich folglich in der Menge und Art der Tätigkeiten die sie dem menschlichen Bediener, in diesem Fall dem Fahrer, abnehmen. Hierzu werden in der Literatur unterschiedliche Kriterien herangezogen. In Tabelle 2.1 sind die von Endsley und Kiris (1995) beschriebenen fünf Stufen der Automation dargestellt. Je nach Stufe obliegt es dem Menschen oder der Automation zu entscheiden oder zu agieren.

Eine bestimmte Automatisierungsstufe muss immer im Kontext der durch das System beherrschbaren Umgebungsbedingungen betrachtet werden. Ein ACC System ist beispielsweise bisher lediglich in einem eng umrissenen Verkehrsszenario in der Lage, den Abstand selbständig zu regeln. Komplexe Situationen, wie das Reißverschlussverfahren an einer Baustelle, überschreiten die Systemgrenzen. Immer wenn eine Systemgrenze überschritten wird, gibt das Automatisierungssystem die Kontrolle an den Fahrer zurück. Umgekehrt übergibt der



**Abbildung 2.4:** Steigende Verantwortungsübernahme des Fahrzeugs über die Assistenz bis hin zur vollständigen Automation in Anlehnung an Schieben u. a. (2008)

Level of Automation		Roles	
		Human	System
None	1	Decide, Act	-
Decision Support	2	Decide, Act	Suggest
Consensual AI	3	Concur	Decide, Act
Monitored AI	4	Veto	Decide, Act
Full Automation	5	-	Decide, Act

AI = Artificial Intelligence

**Tabelle 2.1:** Die verschiedenen Stufen der Automation nach Endsley und Kiris (1995)

Fahrer in bestimmten Situationen bewusst die Kontrolle aus der Hand und überlässt dem System bestimmte Aufgaben. Hohe Automatisierungsgrade haben neben dem Nutzen für den Fahrer auch negative Effekte. Gerade beim Wechsel der Kontrolle zwischen Automation und Fahrer oder umgekehrt können Probleme auftreten. Nach einer langen Fahrt mit aktiviertem ACC hat sich der Fahrer daran gewöhnt, den Abstand nicht selbst halten zu müssen. Gibt das System die Kontrolle nun aufgrund eines plötzlich eintretenden Ereignisses (z.B. Einscherer) an den Fahrer zurück, muss dieser in sehr kurzer Zeit zurück in den Regelkreis finden und die Situation meistern. Rudin-Brown u. a. (2003) stellen beispielsweise eine Verschlechterung der Reaktion auf ein bremsendes Vorderfahrzeug fest, wenn die Probanden mit aktiviertem ACC fahren.

Endsley und Kiris (1995) fassen die Risiken einer Automation auf folgende Punkte zusammen:

**Verlust von Fähigkeiten** Durch die Übernahme einzelner Tätigkeiten durch das System verlernt der Fahrer mit der Zeit, diese Aufgaben selbst durchzuführen. Arbeitet das System

absolut fehlerfrei und unter allen denkbaren Bedingungen, stellt dies kein Problem dar. Wenn der Fahrer allerdings bei einem Systemausfall wieder auf die verlernten Fähigkeiten angewiesen ist, kann seine Reaktion dadurch verschlechtert werden.

**Verlust des Situationsbewusstseins** Während das System Teile der Umfeldüberwachung für den Fahrer übernimmt, baut dieser kein eigenes mentales Modell der Umgebung auf und kann deshalb im Falle eines Systemausfalls weniger angepasst reagieren (*out-of-the-loop*). Dieser Effekt kann auch dann auftreten, wenn das System Informationen aggregiert weitergibt und der Fahrer keinen Zugriff auf die ursprüngliche, ungefilterte Information hat. Der Fahrer erkennt Fehlerzustände durch die Verdeckung der ursprünglichen Information unter Umständen später. Im Kontext der Fahrerassistenz könnte diese Problematik beispielsweise durch die Zusammenfassung mehrerer Warnungen zu einer einzelnen Warnung auftreten.

**Wachsamkeitsverminderung** Bei einem Rückzug des Fahrers auf rein überwachende Tätigkeiten bleibt ihm nur die Ausführung monotoner Kontrollaufgaben, die negativen Einfluss auf die Wachsamkeit des Fahrers haben können.

**Langsamere Reaktion auf Systemfehler** Ein durch das System initiiertes Rückfall auf niedrigere Automatisierungsstufen ist um so schwieriger, je weniger der Fahrer vorher in den Regelkreis des Fahrzeugs eingebunden war. Im schlimmsten Fall bedeutet dies, dass der Fahrer in einem voll autonomen Fahrzeug zunächst völlig passiv als Passagier im Fahrzeug sitzt und im Falle einer kritischen Situation dennoch manuell eingreifen muss. Durch den sonst recht hohen Grad der Automation können die notwendigen Fähigkeiten für eine solche Korrektur mangelhaft ausgeprägt sein.

**Blindes Vertrauen in das System** Mit längerer Nutzung eines automatisierten Systems baut der Fahrer Vertrauen in dessen Zuverlässigkeit auf. Je länger diese zuverlässige Phase andauert, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass der Fahrer ein durch die Automation unentdecktes kritisches Ereignis dennoch wahrnimmt. Dies wird auch durch die von Parasuraman u. a. (1993) durchgeführte Studie belegt (zitiert nach Bagheri und Jamieson (2004)).

Mit zunehmendem Automatisierungsgrad steigen unweigerlich auch die Anforderungen an die Leistungsfähigkeit des Automatisierungssystems:

**Höhere Situationskomplexität** Die Übernahme zusätzlicher Teile der Fahraufgabe erfordert auch die Auswertung einer größeren Menge an Sensordaten, damit sichergestellt ist, dass die Verkehrssituation ausreichend präzise erfasst wird. Nur so kann das System zum Umfeld passende Handlungen durchführen.

**Steigende Verantwortungsübernahme** Je mehr Funktionen die Automation übernimmt, desto stärker trägt das System die Verantwortung für das Verhalten des Fahrzeugs im Verkehrsumfeld. Fragen der Produkthaftung müssen für zukünftige Systeme geklärt werden (Brühning und Seeck, 2006). Bereits heute erzeugt die Absicherung von Assistenzsystemen einen hohen Aufwand.

Aus diesen Gründen beschränken sich aktuelle Fahrerassistenzsysteme bewusst auf die Bereiche assistiertes und teilautomatisiertes Fahren. Forschungsprojekte wie PReVENT, INVENT oder AKTIV legen den Fokus ebenfalls auf assistiertes bis hoch automatisiertes Fahren, nicht aber auf autonomes Fahren. Dies liegt neben technischen Aspekten auch in der Strategie der Automobilhersteller begründet, die Autofahren nicht nur als reine Zielerreichung vermarkten, sondern als Erlebnis für den Fahrer. Das Interesse, den Fahrer komplett aus der Fahraufgabe zu verbannen ist deshalb gering, auch wenn assistiertes Fahren im Regelfall höhere Ansprüche an die Mensch-Maschine Interaktion stellt. Das Militär hingegen verfolgt das autonome Fahren mit größerem Einsatz, da dort die Erreichung des Missionsziels mit möglichst geringen menschlichen Verlusten über allem steht. Die Grand Urban Challenge<sup>1</sup> (Darms u. a., 2008) ist ein Beispiel für die Förderung der Entwicklung autonomer Fahrzeuge durch das Militär.

### 2.3.2 Assistiertes Fahren

Für ein System, das dem Fahrer im Sinne des vorherigen Abschnitts assistiert, gibt es verschiedene Ausprägungen:

**Information** Dem Fahrer wird zusätzliche Information dargeboten, die er zur Interpretation der Verkehrssituation nutzen kann. Ein Beispiel für eine visuelle Informationspräsentation ist ein Nachtsichtsystem (siehe Abbildung 2.5). Akustische Informationspräsentation kann beispielsweise bei einer Einparkhilfe den verbleibenden Abstand zu einem Hindernis durch Töne darstellen. Kennzeichnend für informierende Assistenzsysteme ist, dass die Information lediglich (gefiltert) dargeboten aber nicht vom System interpretiert wird. Im Beispiel Nachtsichtsystem bedeutet dies, dass der Fahrer mögliche Gefahren selbständig im Bild erkennen muss.

**Warnung** Bei einer Warnung handelt es sich dagegen um eine interpretierte Form der Information (König und Mutschler, 2003), denn um eine Warnung aussprechen zu können, muss das System die Gefährlichkeit einer Situation einschätzen. Die Situation setzt sich für ein Warnsystem immer aus dem momentanen Fahrumfeld und dem Fahrerzustand zusammen. Ein Spurverlassenswarnsystem kann zunächst objektiv bestimmen, ob die Spurmarkierungen überschritten wurden oder dies kurz bevor steht. Eine Warnung ist allerdings nur dann gerechtfertigt, wenn der Fahrer die Spur nicht bewusst verlässt, wie dies beim Ausweichen vor einem Hindernis oder dem Durchführen eines Überholmanövers der Fall ist.

**Eingriff** Das Fahrzeug löst im Falle einer als kritisch interpretierten Situation selbständig notwendige Gegenmaßnahmen aus. In Abgrenzung zu höheren Automatisierungsgraden ist dieser autonome Eingriff nur von kurzer Dauer und beschränkt sich auf die Vermeidung des kurz bevorstehenden Unfalls. Ein Beispiel hierfür sind Systeme die eine autonome Gefahrenbremsung vor Hindernissen durchführen (Ferrara, 2004; Nitz

---

<sup>1</sup><http://www.darpa.mil/grandchallenge>

und Zahn, 2008). Das System übernimmt sowohl die Interpretation der Information als auch die Auswahl und Durchführung einer geeigneten Fahrzeugreaktion.

Es ist nicht ausgeschlossen, dass ein System mehr als eine Assistenzart bietet. Eine Auf-fahrwarnung kann, sofern der Fahrer keine Reaktion auf das Ereignis zeigt, von einem auto-nomen Bremseneingriff gefolgt sein.

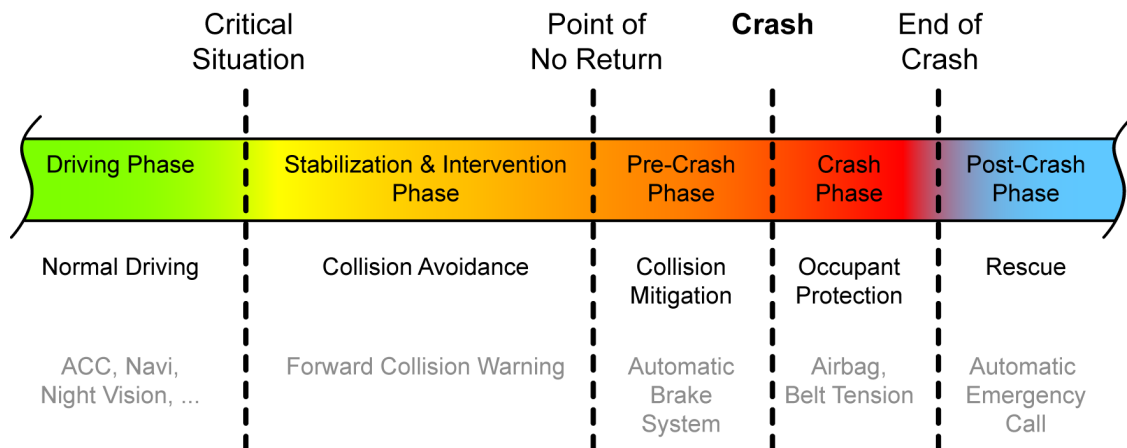
### 2.3.3 Die Phasen eines Unfalls

Abbildung 2.6 zeigt die einzelnen Phasen eines Unfalls nach Freymann (2004) und gibt Bei-spiele für korrespondierende Assistenzsysteme. Im Bereich des normalen Fahrens treten vor allem teil- und hochautomatisierte sowie informierende Systeme in den Vordergrund. Diese Phase ist durch Handlungszeiträume von einigen Sekunden bis zu mehreren Minuten ge-kennzeichnet. In der Phase normalen Fahrens könnte beispielsweise die Ankündigung eines Vorfahrt-Achten-Verkehrszeichens an der nächsten Kreuzung in Form einer unaufdringlichen Information geschehen. In der Collision-Avoidance-Phase bleibt noch Zeit, den Fahrer vor einer akuten Gefahr zu warnen. Nach dem Verstreichen einer typischen Reaktionszeit greift der Fahrer in die Fahrzeugführung ein und bereinigt die Verkehrssituation. Reagiert der Fah-erer nicht, ist der Unfall aufgrund fahrphysikalischer Gesetzmäßigkeiten ab einem bestimmten Zeitpunkt nicht mehr zu verhindern (*point of no return*). Dies begrenzt den Bereich, in dem nur noch die Schwere des Unfalls beeinflussbar ist (*collision mitigation*). Gerade bei Unfällen mit Fußgängern führen verringerte Aufprallgeschwindigkeiten zu einem deutlich geringeren Verletzungsrisiko. Wie Statistiken zeigen (Volkswagen, 2006), reduziert sich die Häufigkeit schwerer Verletzungen und Tötungen zusammengerechnet um 70% bei einer Halbierung der Aufprallgeschwindigkeit von 50 auf 25 km/h. Während der eigentlichen Crash-Phase rückt der passive Schutz der Insassen und anderer Verkehrsteilnehmer rund um das Fahrzeug in den Vordergrund. Eine wichtige Rolle spielen hier die Rückhaltesysteme des Fahrzeugs, Airbags und das Verändern der Karosserieaußenhaut zum Zwecke des Fußgängerschutzes (Kühn u. a., 2007). Nach dem Unfall liegt die Priorität auf einer schnellen Rettung der Insassen beispie-lsweise durch eine automatische Übermittlung der Koordinatenposition des Fahrzeugs an den



Abbildung 2.5: BMW Nachtsichtsystem





**Abbildung 2.6:** Zeitlicher Verlauf eines Unfalls und mögliche Ansatzpunkte für Fahrerassistenzsysteme in Anlehnung an (Freyman, 2004)

rettungsdienst. Ein Beispiel hierfür ist das von der EU geplante System *eCall* (Europäische Kommission, 2006).

Jedes Assistenzsystem ist mit dem Problem konfrontiert, dass die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines Unfalls umso schwerer bestimmbar ist, je mehr Zeit bis zu einem potenziellen Aufprall bleibt. Nach Reichart (2000) lässt sich die Wahrscheinlichkeit eines Unfalls durch die Auswertung eines Fehlerbaums ermitteln. Unter anderem gehen in die Bildung der Eintrittswahrscheinlichkeit die Größen *Fehlerhafte Handlung des Fahrers oder Fehlverhalten* und *Konfliktobjekt vorhanden* ein. Die Beurteilung des Fahrerverhaltens setzt eine Beobachtung der Fahrerhandlungen über einen längeren Zeitraum voraus. Letztendlich findet ein Abgleich mit dem als „normal“ eingestuften Fahrverhalten statt. Je weiter der potenzielle Unfall in der Zukunft liegt, desto mehr mögliche Handlungsalternativen bleiben dem Fahrer den Unfall zu verhindern. Die Wahrscheinlichkeit, dass er *keine* dieser Alternativen nutzt ist zu Beginn relativ gering. Mit zunehmend schwindender Zeit bis zum potenziellen Aufprall nimmt die Zahl der Vermeidungsstrategien ab. Daraus folgt unweigerlich, dass die Einstufung des Fahrerverhaltens durch das Assistenzsystem als „fehlerhaft“ umso sicherer ist, je länger das System mit der Beurteilung wartet. Ähnliche Überlegungen gelten für das Kriterium *Konfliktobjekt vorhanden*. Ob ein Konfliktobjekt vorhanden ist, muss die Fahrzeugsensorik und die dazugehörige Algorithmik bestimmen. Zeitlich weit vor dem Unfall ist meist auch der räumliche Abstand zum potenziellen Konfliktobjekt groß. Die Erkennungsleistung einer Sensorik steigt mit sinkendem Abstand zum Unfallgegner. Spätestens dann, wenn der Aufprall durch Beschleunigungssensoren im Fahrzeug selbst detektiert wird, ist die Wahrscheinlichkeit eines Unfalls gleich eins. Auch hier gilt also wieder die Aussage, dass die Einstufung eines Objekts als unvermeidliches Konfliktobjekt umso sicherer ausfallen wird, je länger das Assistenzsystem mit der Beurteilung wartet.

## 2.4 Prinzipieller Aufbau von Fahrerassistenzsystemen

Die Informationsverarbeitung, die in Fahrerassistenzsystemen abläuft, weist Ähnlichkeiten zum menschlichen Informationsverarbeitungsprozess auf (Wandke, 2005). Die Wahrnehmung im Fahrzeug übernimmt die *Sensorik* (Abbildung 2.7). Diese erfasst abhängig vom Zweck des Assistenzsystems relevante Objekte im Umfeld des Fahrzeugs und erzeugt eine abstrakte Repräsentation der aktuellen Verkehrssituation (*Situationserfassung*). Es kann sich dabei beispielsweise um Fahrzeuge handeln, die über ihre momentane Geschwindigkeit und ihre Position relativ zum eigenen Fahrzeug charakterisiert sind. Ebenfalls relevant ist der übergeordnete Kontext, in dem sich das Fahrzeug befindet (Abbiegemanöver, Autobahnfahrt, etc.).

Daran schließt sich eine Analyse der vorliegenden Situation an, die in eine Aktionsentscheidung mündet. Dies kann im Falle eines Auffahrwarnsystems bedeuten, dass die Analyse ein stark verzögerndes Vorderfahrzeug ermittelt hat, und der Fahrer bisher keine Gegenmaßnahmen eingeleitet hat. Daraufhin würde in der Phase der *Aktionsausführung* eine entsprechende Warnmeldung an die Mensch-Maschine-Schnittstelle des Fahrzeugs ausgegeben werden. Alternativ findet ein direkter Eingriff in die Fahrzeugdynamik statt.

## 2.5 Unfalltypen im Kreuzungsbereich und entsprechende Assistenzsysteme

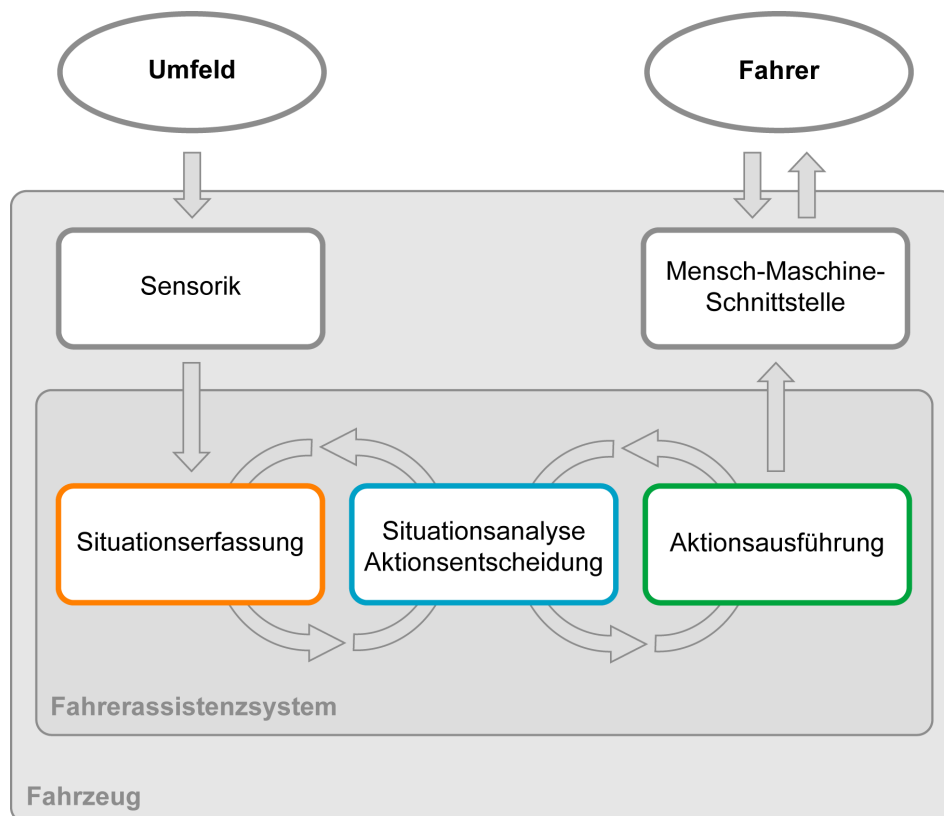
Angetrieben durch das ehrgeizige Ziel der Europäischen Kommission, bis zum Jahre 2010 die Anzahl der Verkehrstoten zu halbieren (European Commission, 2001) (Vergleichswert 2001), sind in unterschiedlichen Förderprojekten unter Beteiligung von Automobilherstellern, Zulieferern und Forschungseinrichtungen zahlreiche Neuentwicklungen auf dem Gebiet der Fahrerassistenz entstanden. So leistete das durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte Projekt Invent<sup>2</sup> (Intelligenter Verkehr und nutzergerechte Technik) in den Jahren 2001 bis 2005 wichtige Beiträge zu Fragestellungen der aktiven Sicherheit. Vor allem die Teilprojekte „Fahrumgebungserfassung und -interpretation“ (FUE), „Vorausschauende Aktive Sicherheit“ (VAS) sowie „Fahrerverhalten und Mensch-Maschine-Interaktion“ (FVM) beleuchten wichtige Aspekte bei der Umsetzung künftiger Fahrerassistenzsysteme. Das Nachfolgeprojekt Aktiv<sup>3</sup> (Adaptive und Kooperative Technologien für den Intelligenten Verkehr) vertieft — aufbauend auf den Vorarbeiten im Projekt Invent — seit 2006 im Teilprojekt „Aktive Sicherheit“ unter anderem Fragestellungen zur Kreuzungsassistenz, autonomen Gefahrenbremsung und Fußgängersicherheit. Auf europäischer Ebene setzte das Projekt „PReVENT“<sup>4</sup> als Teil des sechsten EU Rahmenprogramms in den Jahren 2004 bis 2007

---

<sup>2</sup><http://www.invent-online.de/>

<sup>3</sup><http://www.aktiv-online.org/>

<sup>4</sup><http://www.prevent-ip.org/>



**Abbildung 2.7:** Die Komponenten eines Fahrerassistenzsystems innerhalb des Systems Mensch–Fahrzeug–Umfeld in Anlehnung an (Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2001)

in ähnlichen Themenbereichen Akzente. Das Teilprojekt „INTERSAFE“ adressierte die hohen Unfallzahlen im Kreuzungsbereich und das Teilprojekt „COMPOSE“ suchte nach neuen Lösungen zum Fußgängerschutz.

Abbildung 2.8 fasst die in den genannten Forschungsprojekten untersuchten Kreuzungsszenarien zusammen. Die Systeme lassen sich drei Kategorien zuordnen:

**Kollisionsvermeidung** Systeme dieser Kategorie sollen helfen, Kollisionen im Kreuzungsbereich zu vermeiden. Adressiert werden alle potenziellen Konflikte zwischen zwei Fahrzeugen oder einem Fahrzeug und einem verletzlichen Verkehrsteilnehmer (Motorradfahrer, Fahrradfahrer, Fußgänger). Neben zukünftigen Funktionen zur Vermeidung von Kollisionen beim Abbiegen sind auch bereits existierende Spurwechselwarnsysteme und Auffahrwarnsysteme für die Kreuzung relevant. Da Spurwechsel und Auffahrwarnsysteme bereits von mehreren Automobilherstellern in Serienfahrzeugen verbaut werden, verzichtet diese Arbeit auf eine technische Beschreibung. In die Überlegungen zu integrierten Mensch-Maschine-Interaktionskonzepten werden sie im weiteren Verlauf der Arbeit dennoch mit einbezogen.

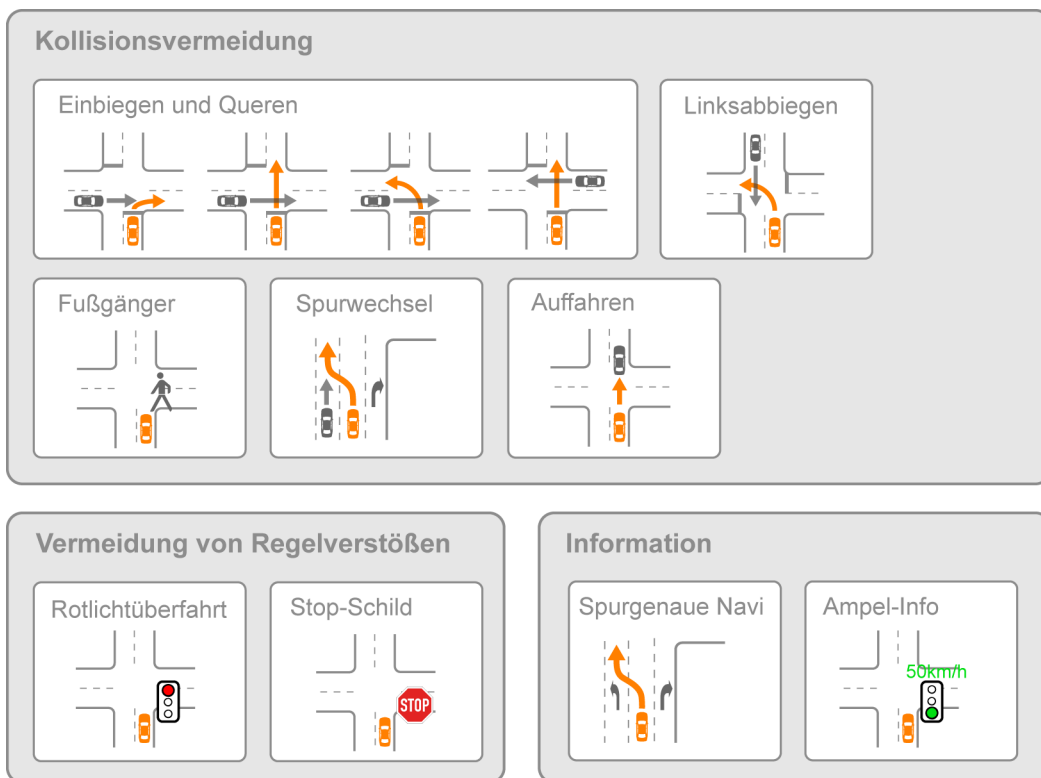


Abbildung 2.8: Durch Fahrerassistenzsysteme adressierte Szenarien im Kreuzungsbereich

**Vermeidung von Regelverstößen** Obwohl die Missachtung einer Verkehrsregelung zunächst nicht zwangsläufig zu einem Unfall führt, so ist die Wahrscheinlichkeit dennoch stark erhöht. Deshalb versuchen Systeme der zweiten Kategorie solche ungewollten Regelverstöße zu vermeiden. Die wichtigsten Vertreter sind Warnungen vor der ungebremsten Überfahrt eines Stoppschildes und einer roten Ampel.

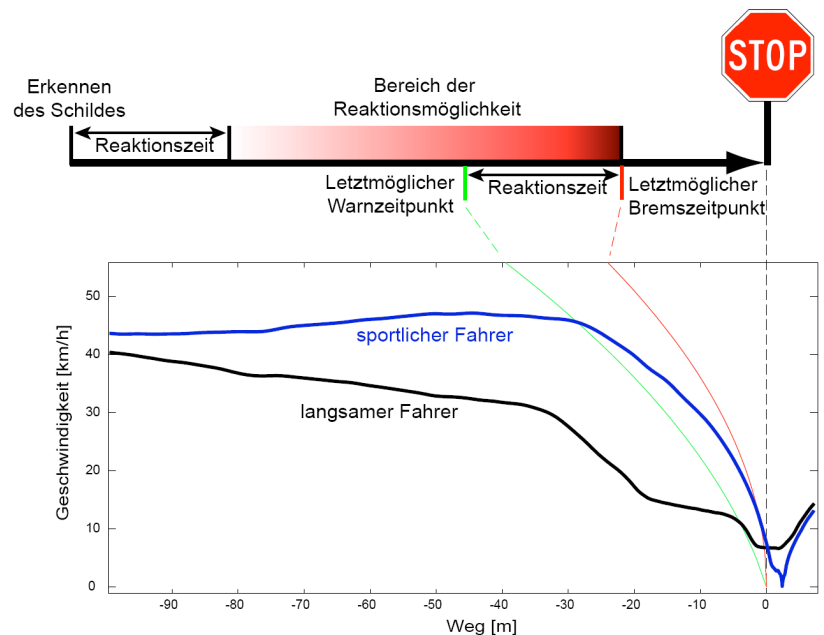
**Information** Zusätzliche Informationen ermöglichen dem Fahrer eine angenehmere und souveränere Kreuzungsdurchfahrt. Die spurgenaue Navigation kennt die momentane Fahrzeugposition mit hoher Genauigkeit und kann dem Fahrer so explizite Spurwechselhinweise geben. Während der Annäherung an eine Ampel erhält der Fahrer Geschwindigkeitsempfehlungen für ein verbrauchsoptimiertes Geschwindigkeitsprofil (siehe Kapitel 6).

Bisherige Arbeiten zu Kreuzungsassistenzfunktionen erstellen meist Lösungen, die auf einzelne (Unfall-)Szenarien zugeschnitten sind. Im Rahmen eines Top-Down-Vorgehens werden ausgehend von einem Unfallszenario die Anforderungen an Algorithmik und Sensorik spezifiziert. Teilweise haben technische oder prinzipbedingte Einschränkungen der Systeme Auswirkungen auf mögliche Konzepte zur Mensch-Maschine-Interaktion. Die folgenden Abschnitte fassen die wichtigsten Arbeiten auf dem Gebiet der Kreuzungsassistenz zusammen und beleuchten vor allem Aspekte der Interaktion mit dem Fahrer. Es wird kein Anspruch auf eine Wiedergabe aller veröffentlichten technischen Umsetzungen oder Varianten erhoben.

### 2.5.1 Stoppschildmissachtung

Auswertungen der BMW-Unfalldatenbank durch Meitinger u. a. (2004) weisen Stoppschildmissachtungen als häufiges Unfallszenario aus. Es wird eine Unterscheidung zwischen zwei verschiedenen Ausprägungen getroffen. Im ersten Fall kommt das Fahrzeug an der Halte- linie zum stehen, beim Wiederanfahren wird vom Fahrer jedoch ein vorfahrtsberechtigter Querverkehr übersehen, und es kommt zum Unfall. Im zweiten Fall wird überhaupt nicht am Stoppschild angehalten und die Kreuzung mit unverminderter Geschwindigkeit überquert („Stoppschilddurchfahrt“). Während ein mögliches Assistenzsystem für den ersten Fall detaillierte Informationen über den herannahenden vorfahrtsberechtigten Verkehr benötigt, ist für den zweiten Fall die Kenntnis über die Existenz eines Stoppschildes und dessen genaue Position ausreichend. Von Meitinger u. a. (2004) wird der zweite Fall in Form eines Warnsystems adressiert. Eine Erkennung des Stoppschildes kann entweder durch Bildverarbeitung oder die Auswertung einer digitalen Karte erfolgen. Abschnitt 2.5.4 behandelt Unfälle, die sich beim Einbiegen oder Queren einer vorfahrtsberechtigten Straße ereignen.

Während der Annäherung an ein Stoppschild muss das System entscheiden, ob der Fahrer das Stoppschild gesehen hat und damit eine Warnung unterbleiben sollte, oder ob der Fahrer das Stoppschild übersehen hat und damit eine Warnung berechtigt ist. Von Meitinger u. a. (2004) wird diese Absichtserkennung durch die Beobachtung des Fahrverhaltens, insbesondere des Brems- und Verzögerungsverhaltens, realisiert. Das System gleicht das aktuelle Fahrverhalten gegen ein vorher durch Probandenversuche ermitteltes *Normalverhalten* ab und entscheidet so über die Ausgabe einer Warnung. Hier zeigt sich bereits ein grundlegendes Problem von Warnsystemen. Letztendlich soll die Anzahl von nicht berechtigten Warnungen (*false positives*) aus naheliegenden Gründen so gering wie möglich ausfallen. Gleichzeitig ist aber auch die Zahl der unterlassenen Warnungen (*false negatives*) zu minimieren. Eine Entscheidung des Systems über die Ausgabe einer Warnung sollte dementsprechend so spät wie möglich und so früh wie nötig erfolgen. Der letztmögliche Warnzeitpunkt lässt sich im Falle eines Stoppschildes durch die Fahrphysik und die benötigte Reaktionszeit des Fahrers durch *Rückwärtsrechnung* ermitteln (siehe Abbildung 2.9). Nähert sich ein sportlicher Fahrer einem Stoppschild an, so zeigt dieser bis zum letztmöglichen Warnzeitpunkt noch keine Änderung seines Fahrverhaltens. Das System kann also nicht entscheiden, ob es sich um einen sportlichen Fahrer handelt, der das Stoppschild gesehen hat und kurz darauf ohnehin zu bremsen beginnen wird oder ob es sich um einen langsameren Fahrer handelt, der das Stoppschild übersehen hat. Diese Problematik wird von Meitinger u. a. (2004) mit dem Begriff des *Warn-dilemmas* betitelt. Probandenversuche zeigten, dass diese Konstellation bei Stoppschildanfahrrten selbst bei sportlichen Fahrern äußerst selten auftritt. Dies wird auch durch Messungen in Berndt u. a. (2007) bestätigt. Nicht zu vernachlässigen ist die Tatsache, dass eine möglichst späte Warnung zwar dem System eine bessere Entscheidung ermöglicht, gleichzeitig aber der Fahrer dadurch einem höheren Zeitdruck durch eine kurzfristige Reaktion ausgesetzt ist.



**Abbildung 2.9:** Verschiedene Annäherungsverläufe an ein Stoppschild aus (Meitinger u. a., 2004)

## 2.5.2 Rotlichtmissachtung und Geschwindigkeitsempfehlungen

Ein System, das den Fahrer vor der Überfahrt einer roten Ampel warnen soll, unterscheidet sich nicht grundlegend von einem Stoppschildwarnsystem. Auch hier muss die Erkennung der Fahrerabsicht bis zu einem bestimmten Zeitpunkt erfolgen. Zusätzlich ist in diesem Fall die Kenntnis des aktuellen Ampelzustands erforderlich. Diesen über Methoden der Bildverarbeitung zu ermitteln gestaltet sich schwierig. Zum einen kann es an komplexeren Kreuzungen verschiedene Ampeln für unterschiedliche Richtungen geben, sodass zusätzlich eine genaue Erkennung der Spurmarkierungen und deren Zuordnung zu den Ampeln erforderlich ist. Zum anderen ist der notwendige Öffnungswinkel einer Kamera bei kleineren Abständen zur Ampel sehr groß und es können leicht Verdeckungen durch andere Fahrzeuge auftreten. Im INTERSAFE Projekt setzt man deshalb eine Funkverbindung zwischen dem Fahrzeug und der Ampel voraus, um die Information über den aktuellen Status der Ampel auszutauschen (Furstenberg u. a., 2007). Der Fahrer wird zunächst über eine rote Ampel dezent informiert. Bei Ausbleiben einer Reaktion erfolgt die Ausgabe einer Warnung. Diese Abfolge wird auch von Williams (2007) vorgeschlagen. Ist die Ampel darüber hinaus in der Lage, eine Prognose über den *zukünftigen* Status zu übermitteln, so lässt sich damit zusätzlich zur reinen Sicherheitsfunktion ein Informationssystem in Form einer Geschwindigkeitsempfehlung darstellen. Für eine detaillierte Betrachtung sei auf Kapitel 6 verwiesen.

### 2.5.3 Linksabbiegen

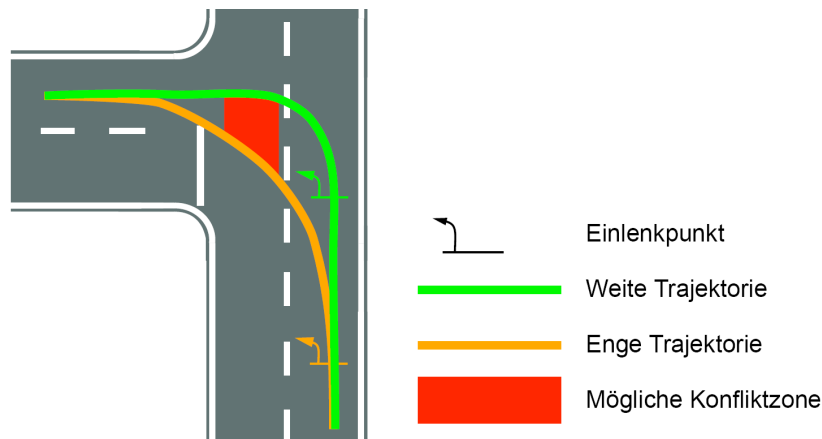
Das Linksabbiegen an einer Kreuzung erfordert eine korrekte Einschätzung der Geschwindigkeit und des Abstands des entgegenkommenden Verkehrs durch den Fahrer. Ein Fahrerassistenzsystem kann diese Einschätzung mittels Laser- oder Radar-Sensorik in den meisten Fällen besser als der Mensch durchführen. Schwieriger ist hier allerdings die Bestimmung der Fahrerabsicht. Eine Warnung sollte nur dann erfolgen, wenn der Fahrer auch wirklich ein Abbiegemanöver einleiten möchte. Ein gesetzter Blinker beispielsweise ist als Entscheidungskriterium nicht geeignet. War es bei der Stoppschildassistentz ausreichend, die Anhalteabsicht zu erkennen, so ist die mögliche Varianz in diesem Szenario wesentlich höher. Der Fahrer kann zwischen verschiedenen Abbiegetrajektorien wählen (siehe Abbildung 2.10) und er kann mit oder ohne vorherigem Anhalten eine passende Lücke im Gegenverkehr nutzen.

Meitinger u. a. (2006) legen dar, dass eine Entscheidung über das Auslösen einer Warnung erst am Einlenkpunkt getroffen werden kann. Zu diesem Zeitpunkt bleibt allerdings kaum Zeit, ein Eindringen des Fahrzeugs in die Gegenfahrbahn zu verhindern. Untersuchungen von Meitinger u. a. (2006) beziffern die durchschnittliche Eindringtiefe bei einer Umsetzung als Warnsystem auf ca. zwei Meter. Von einer Unfallvermeidung kann hier keine Rede sein. Deshalb wird die Machbarkeit eines Warnsystems für dieses Unfallszenario angezweifelt und eine Implementierung als autonomes Eingriffssystem vorgeschlagen.

### 2.5.4 Einbiegen und Queren

Im Szenario Einbiegen und Queren kann es zum Unfall kommen, wenn der Fahrer die Vorfahrtsregelung bzw. vorfahrtsberechtigzte Fahrzeuge übersieht oder wenn er die Geschwindigkeit bzw. den Abstand herannahender vorfahrtsberechtigter Fahrzeuge falsch einschätzt. Ein Fahrerassistenzsystem für den Kreuzungsbereich muss deshalb die Position und die Geschwindigkeit der querenden Fahrzeuge kennen. Dies kann durch fahrzeugautarke Sensorik erfolgen (z.B. Fuerstenberg u. a., 2007; Rössler und Fuerstenberg, 2007; Fuerstenberg, 2006) oder auch mittels kooperativer Sensorik (z.B. Klanner, 2008; Misener und Sengupta, 2005). Letztere setzt eine Kommunikationsverbindung und einen Informationsaustausch zwischen den relevanten Fahrzeugen voraus. Dem Nachteil einer aufwändigeren verteilten Systemarchitektur steht der Vorteil einer Erkennung potenzieller Kollisionsgegner auch ohne direkten Sichtkontakt gegenüber. Als Konsequenz erhält der Fahrer unter Umständen eine Warnung vor einem Fahrzeug, das er nicht sieht.

Eine wesentliche Problemstellung bei der Umsetzung einer Assistenz beim Einbiegen und Queren ist die Kompensation möglicher Sensorungenauigkeiten. Die Erfassung der Position und Geschwindigkeit potenzieller Kollisionsgegner kann abhängig vom Sensorsystem nur mit einer begrenzten Genauigkeit erfolgen. Wird der Abstand eines herannahenden vorfahrtsberechtigten Fahrzeugs vom System zu groß eingeschätzt, so kann es zu *false negatives* kommen, d.h. dem Unterbleiben einer Warnung obwohl diese gerechtfertigt gewesen wäre. Der umgekehrte Fall führt hingegen zu unnötigen Warnungen, *false positives*. Letztendlich lässt



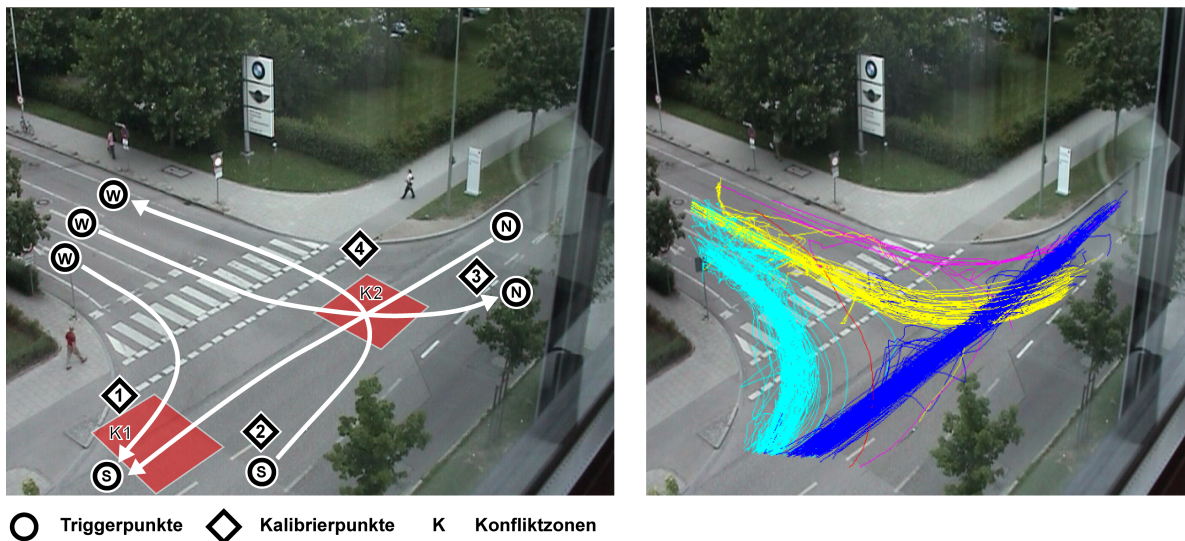
**Abbildung 2.10:** Konfliktzone beim Linksabbiegen unter Berücksichtigung verschiedener Abbiegetrajektorien aus (Meitinger u. a., 2006)

sich die Sensorungenauigkeit nur durch den Einbau einer passenden Sicherheitsmarge kompensieren. Dies bedeutet jedoch, dass das System potenziell öfter in Situationen warnt, in denen eine Warnung nicht gerechtfertigt ist. Ob eine Warnung gerechtfertigt ist, hängt zwar zunächst von der Fahrphysik ab, die individuelle Einschätzung des Fahrers hat allerdings einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss. Deshalb wurde im Rahmen eines Experiments auf dem BMW Messgelände versucht, den Zeitpunkt der Warnung so zu optimieren, dass dieser von möglichst vielen Fahrern als akzeptabel eingestuft wird (Klanner u. a., 2008). Zusätzlich wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Softwareprogramm entwickelt, das das Fahrverhalten von realen Verkehrsteilnehmern mittels Bildverarbeitung erfasst. Hierzu wurde eine Kamera an geeigneter Stelle in der Nähe einer Kreuzung platziert und die Kreuzungsgeometrie über einige Kalibrierpunkte vermessen (siehe Abbildung 2.11). Die Definition von Triggerpunkten und Konfliktzonen ermöglicht dann die gezielte Suche nach bestimmten Verkehrskonstellationen und im Folgenden die Berechnung der von den Fahrern gewählten Zeitlücken. Für eine ausführliche Beschreibung des Verfahrens sei auf die Veröffentlichung verwiesen (Klanner u. a., 2008).

### 2.5.5 Fußgänger und Fahrradfahrer

Beim Queren von Fuß- oder Fahrradwegen während des Abbiegevorgangs kann es zu Konflikten mit schwächeren Verkehrsteilnehmern kommen (vulnerable road users, VRU). Im COMPOSE Projekt (Walessa, 2006) werden, bedingt durch eine nach vorne gerichtete Fahrzeugsensorik, ausschließlich Kollisionen mit Fußgängern berücksichtigt, die an einem geraden Fahrbahnabschnitt die Straße betreten (siehe Fall *Überschreiten* in der Unfallstatistik Abbildung 1.1 auf Seite 6). Unfälle beim Abbiegen bleiben hingegen unberücksichtigt. Gandhi und Trivedi (2005) nutzen Kameras mit einem extrem großen Öffnungswinkel, um auch Fußgänger, die sich seitlich oder schräg hinter dem Fahrzeug befinden, zu erfassen. Insbesondere



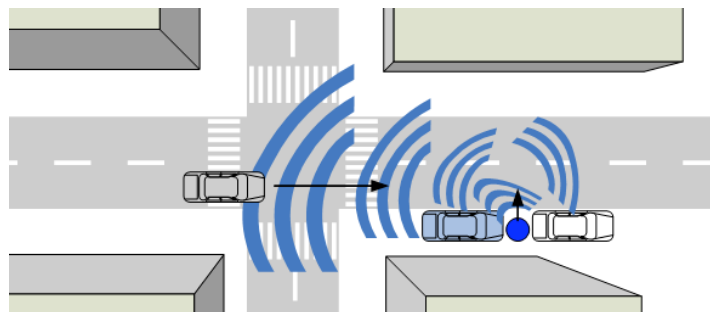


**Abbildung 2.11:** Automatische Erkennung der Fahrzeugtrajektorien und Berechnung der Zeitlücken beim Einbiegen mittels Bildverarbeitung

bei LKW hilft eine Überwachung des toten Winkels während eines Abbiegemanövers, ein Übersehen anderer Verkehrsteilnehmer durch den Fahrer zu vermeiden (Schulz, 2005).

Im Rahmen des AMULETT Projekts<sup>5</sup> (Schwarz, 2007; Schwarz und Raßhofer, 2007) werden sogenannte *reactive targets* (tags) zur eindeutigen Identifikation von Fußgängern verwendet (Abbildung 2.12). Diese Tags werden von Fußgängern – eingearbeitet in Kleidung oder Accessoires (z.B. Schulranzen) – getragen und reagieren auf Funk-Impulse von Fahrzeugen. Dadurch lässt sich ein Fußgänger zweifelsfrei klassifizieren und dessen Position auch ohne direkten Sichtkontakt bestimmen.

<sup>5</sup><http://www.projekt-amulett.de/>



**Abbildung 2.12:** Erkennung von verdeckten Fußgängern durch kooperative Sensorik im AMULETT-Projekt

## 2.6 Aufbau und Erweiterung der BMW Fahrsimulation

Alle Fahrsimulatoruntersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wurden im Fahrsimulationszentrum der BMW Group Forschung und Technik durchgeführt. Dort sind neben Fahrsimulatoren unterschiedlicher Größe ein Usability-Lab, Arbeitsräume für Versuchsleiter sowie Werkstätten und Büros unter einem Dach vereint.

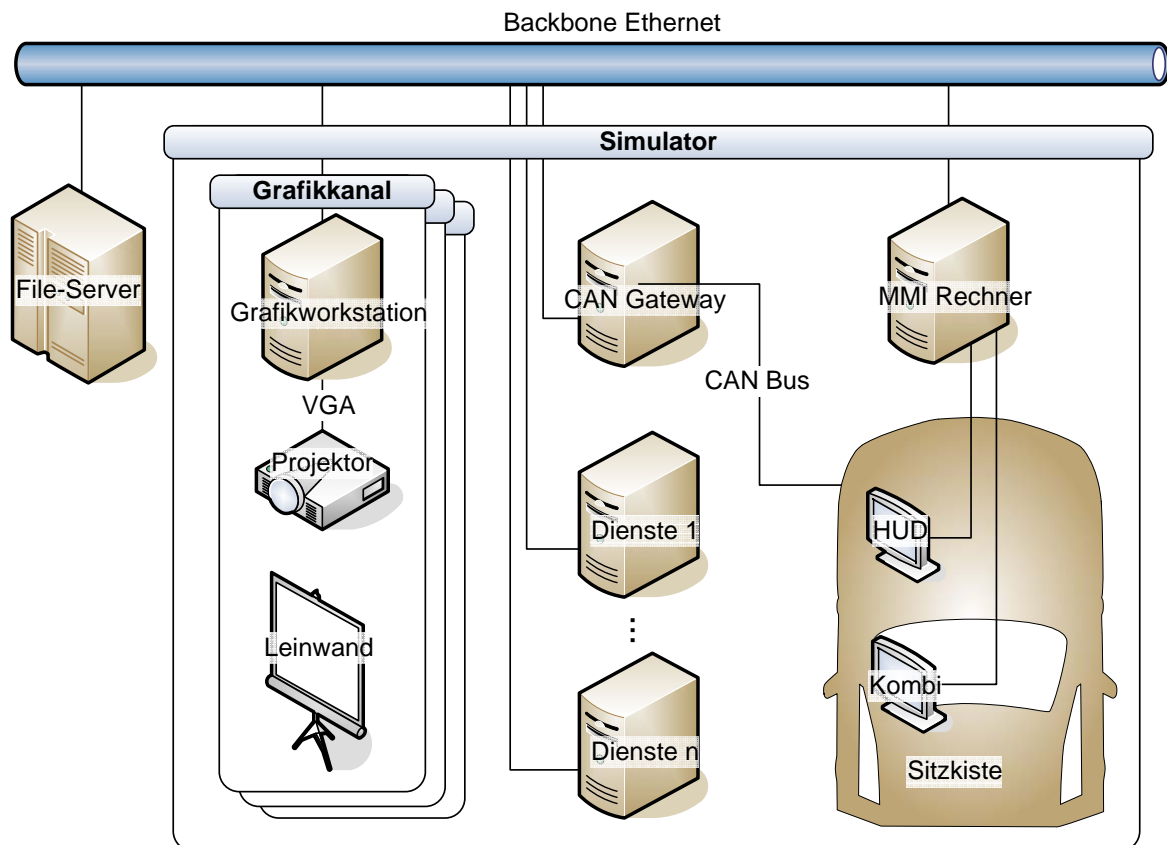
Den prinzipiellen Aufbau der IT-Infrastruktur eines Fahrsimulators bei BMW zeigt Abbildung 2.13. Alle Rechner der Fahrsimulation sind über ein schnelles Backbone-Netzwerk miteinander verbunden. Jeder Projektor bzw. jedes Plasmadisplay für die Darstellung der virtuellen Umgebung wird von jeweils einem Grafikrechner angesteuert. Als Sitzkisten kommen entweder umgebaute Fahrzeuge oder Ergonomie-Modelle zum Einsatz. In beiden Fällen stehen dem Probanden – je nach Versuchsgegenstand – die normalen Bedienelemente im Fahrzeug zur Verfügung. Diese werden über ein CAN-Gateway an die Fahrsimulation angebunden. Nicht vorhandene Steuergeräte werden über eine Restbussimulation mittels CANoe<sup>6</sup> in Software nachgebildet. Zusätzlich stehen weitere Rechner für allgemeine Berechnungsaufgaben zur Verfügung (*Dienste 1 bis n* in der Abbildung). Dazu gehört die Simulation der Fahrzeugdynamik und des umgebenden Verkehrs sowie die virtuelle Umsetzung von Fahrerassistenzsystemen. Je nach Anzahl der Grafikkanäle oder Umfang der allgemeinen Berechnungsaufgaben kann die Anzahl der benötigten Rechner pro Fahrsimulator schwanken. Das gemeinsame Backbone-Netzwerk erlaubt es, die Rechner den Simulatoren bedarfsgerecht zuzuordnen. Das auf allen Rechnern einheitliche Software-Framework SPIDER (Strobl, 2003) stellt die dazu notwendige Kompatibilität sicher. Für den Versuch in Kapitel 5 wurden beispielsweise acht Grafikrechner für die verschiedenen Ansichten benötigt (siehe Abbildung 5.6 auf Seite 87). Die Darstellung von Kombi- und Head-Up-Display sowie des zentralen Informationsbildschirms übernehmen weitere MMI-Rechner.

### 2.6.1 Vereinfachung des MMI-Entwicklungsprozesses

Für die Simulation von Anzeigen in Kombi- und Head-Up-Display nutzt die BMW Group Forschung und Technik das spezielle Software-Framework *BORIS*. Das in C++ entwickelte und unter Microsoft Windows lauffähige Programm empfängt über ein spezielles UDP-Protokoll Daten von der Fahrsimulation oder der Fahrzeugelektronik (im Falle eines realen Versuchsträgers) und setzt diese in eine entsprechende grafische Darstellung um. Die Protokolldaten enthalten beispielsweise die Stellung der Zeigerinstrumente oder den Status verschiedener Fahrerassistenzanzeigen. Abbildung 2.14 zeigt auf der linken Seite den bisherigen Entwicklungsprozess. Der MMI-Entwickler spezifiziert zunächst das Kommunikationsprotokoll mittels einer XML-Datei. Hier wird festgelegt, welche Nachrichten das MMI-System empfangen soll und wie diese aufgebaut sind. Aus dieser Spezifikation erzeugt ein Software-Tool passende Header-Definitionen. Die Grafik selbst muss in Form einer SVG-Datei<sup>7</sup> vorlie-

<sup>6</sup>[http://www.vector.com/vi\\_canoede.html](http://www.vector.com/vi_canoede.html)

<sup>7</sup><http://www.w3.org/TR/SVG11/>



**Abbildung 2.13:** Schematischer Aufbau eines Fahrsimulators der BMW Group Forschung und Technik

gen und wird bei BMW mit Hilfe des Adobe Illustrator erzeugt. Es handelt sich hierbei nur um die statischen Elemente der Anzeigen. Das BORIS-System sieht vor, die Funktion – also beispielsweise das Drehen eines Zeigers – in einer C++-Klasse zu implementieren und dazu die entsprechenden Protokoll-Header einzubinden. Das BORIS-System nutzt den Adobe-SVG-Viewer um die Grafiken anzuzeigen und erlaubt es der C++-Klasse, auf die Elemente in der SVG-Datei zuzugreifen und diese zu manipulieren. Vor dem Start des BORIS-Systems muss die zusätzliche Klasse zusammen mit den übrigen Quellen kompiliert werden.

Das bisherige Vorgehen bei der MMI-Entwicklung hat einige Nachteile:

- Bei jeder Änderung am Verhalten der Anzeigen muss das gesamte BORIS System neu kompiliert werden. Dies setzt eine entsprechende Entwicklungsumgebung voraus.
- Der MMI-Entwickler muss mit der C++-Syntax und der Klassen-Hierarchie des BORIS Systems vertraut sein.
- Die Möglichkeiten zur Darstellung und zur Animation von Inhalten ist im SVG-Format beschränkt, des weiteren sind bestimmte Anforderungen nur umständlich umsetzbar.

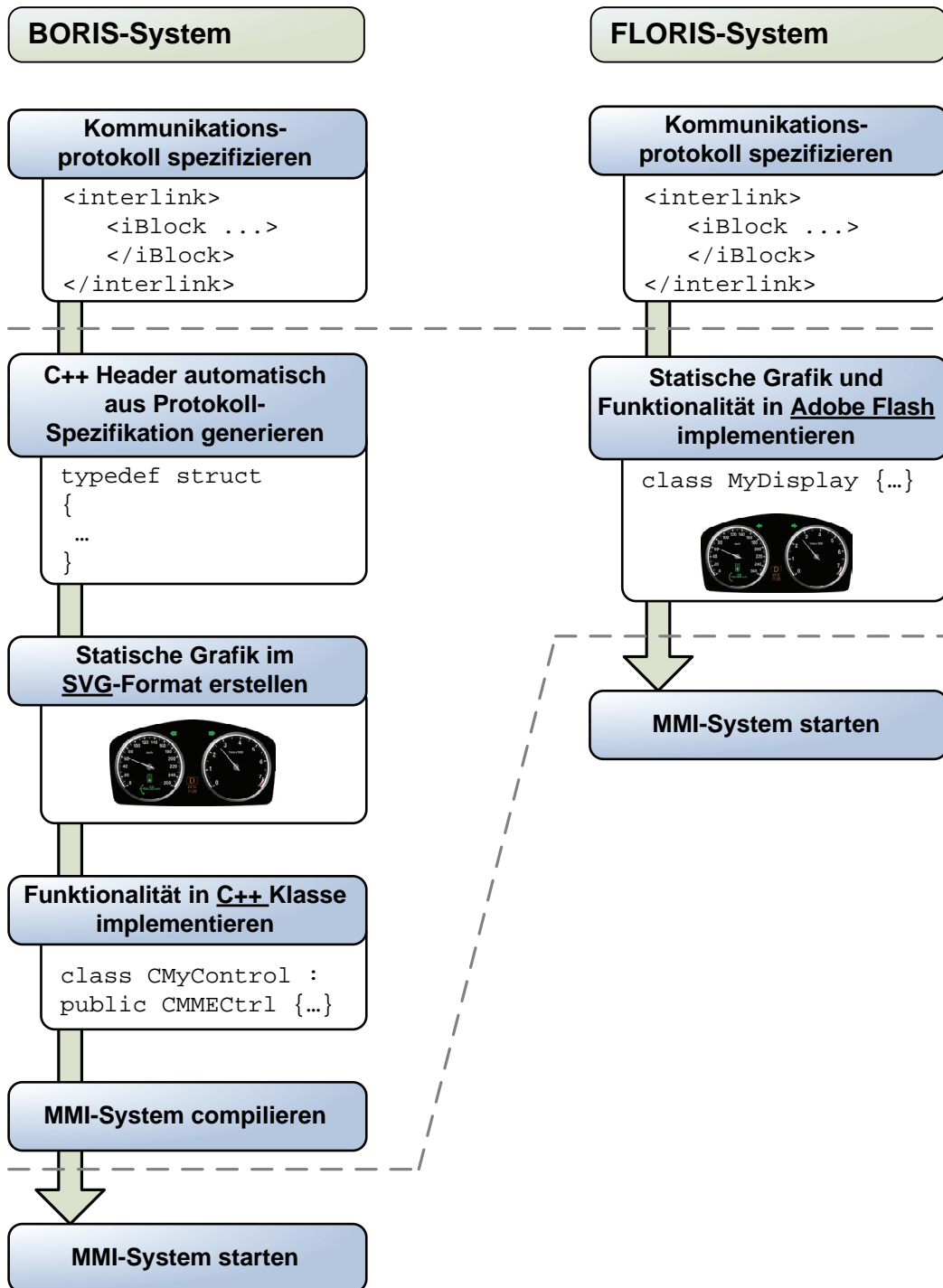


Abbildung 2.14: Vereinfachung des MMI-Entwicklungsprozesses durch Nutzung von Adobe Flash als Front-End

Deshalb wurde im Rahmen dieser Arbeit ein neues System implementiert, das die genannten Nachteile nicht aufweist. Abbildung 2.14 zeigt auf der rechten Seite den vereinfachten Entwicklungsprozess durch Einsatz des neuen *FLORIS*-Frameworks. Statt die Grafik und die Funktion losgelöst voneinander zu implementieren, verwendet das *FLORIS* Framework Adobe Flash als Anzeige-Engine. Dies hat den Vorteil, dass keine Kenntnis der Sprache C++ notwendig ist und die Implementierung innerhalb einer gemeinsamen Entwicklungsumgebung stattfindet. Bei Änderungen an der Grafik oder dem Verhalten der Anzeigen muss beim *FLORIS*-System lediglich die Flash-Datei ausgetauscht werden. Zusätzlich wird die Konfiguration der verschiedenen Anzeige-Fenster (z.B. Head-Up und Kombi) und die Zuordnung der Protokoll-Variablen auf die entsprechenden Flash-Variablen in einer grafischen Oberfläche durchgeführt (siehe Abbildung 2.15). Das *FLORIS*-System wird mittlerweile in allen Versuchsträgern und Simulatoren der BMW Group Forschung und Technik eingesetzt.

### 2.6.2 Verbesserung der Anbindung an Fahrsimulation und Versuchsträger

Für die Entwicklung der Regler und Funktionslogik von Fahrerassistenzsystemen setzt die BMW Group Forschung und Technik MATLAB Simulink<sup>8</sup> ein. Die Simulink-Modelle werden für erste Tests direkt auf Windows Rechnern ausgeführt und später in Versuchsträger oder die Fahrsimulation übertragen. Mit dem Real-Time Workshop<sup>9</sup> wird hierzu aus den Simulink-Modellen echtzeitfähiger C-Code generiert, der im Versuchsträger von einer dSPACE-Auto-box<sup>10</sup> und in der Fahrsimulation direkt vom Linux-Betriebssystem ausgeführt wird. Die Darstellung der dazugehörigen Anzeige-Konzepte im Fahrzeug erfolgte bisher über das Software-Programm ControlDesk<sup>11</sup>. Die hohe Qualität des Anzeige-/Bedienkonzepts ist – neben der Stimmigkeit der haptischen Rückmeldungen – eine wichtige Voraussetzung für eine positive Beurteilung eines Assistenzsystems durch den Fahrer. ControlDesk-Anzeigen lassen jedoch die notwendige Darstellungsqualität teilweise vermissen (z.B. Framerate, Gleichmäßigkeit der Zeiger-Bewegungen). Aus diesem Grund sollen die Anzeigen für Präsentationen und Versuche künftig ebenfalls mit Hilfe des *FLORIS* Systems umgesetzt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde für diesen Zweck ein Tool entwickelt, das aus der XML-Protokoll-Spezifikation entsprechende Simulink-Blöcke generiert (siehe Abbildung 2.16).

Für jeden Paket-Typ erzeugt das Programm einen passenden Block und den dazugehörigen S-Function-Code in einer Bibliothek. Die Aus- bzw. Eingänge spiegeln die Inhalte des UDP-Pakets wider. So kann der Fahrerassistenz-Entwickler die für die Anzeige notwendigen Werte im Modell erzeugen und gesammelt an das *FLORIS* System weiterleiten. Durch eine plattformunabhängige Implementierung ist dabei keine Unterscheidung zwischen einer Anwendung

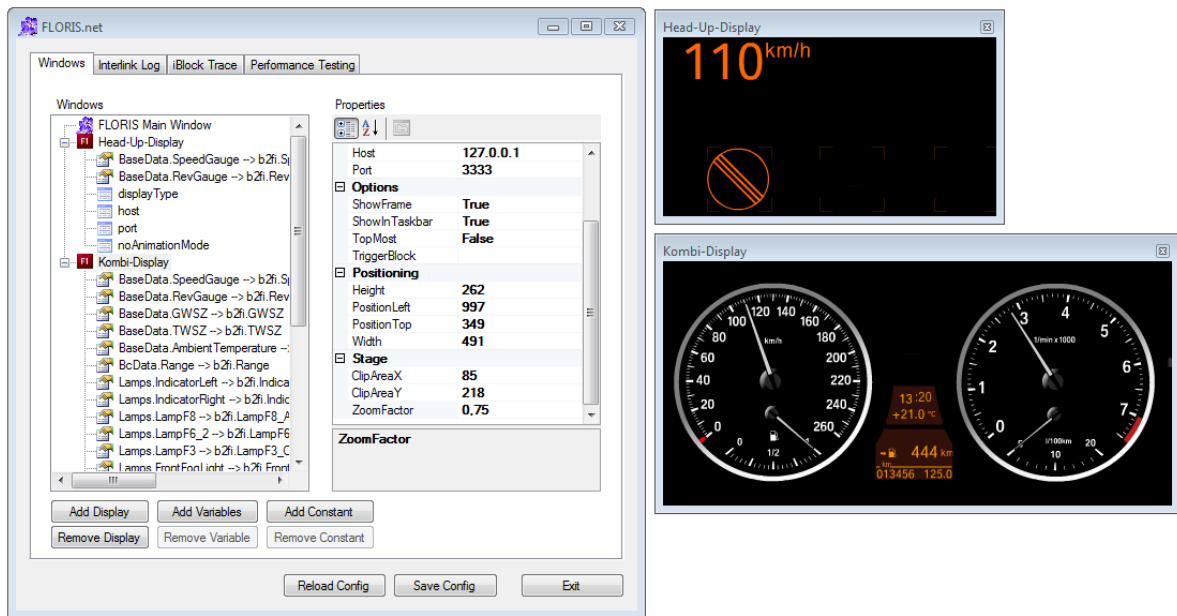
---

<sup>8</sup><http://www.mathworks.com/products/simulink/>

<sup>9</sup><http://www.mathworks.com/products/rtw/>

<sup>10</sup><http://www.dspace.de>

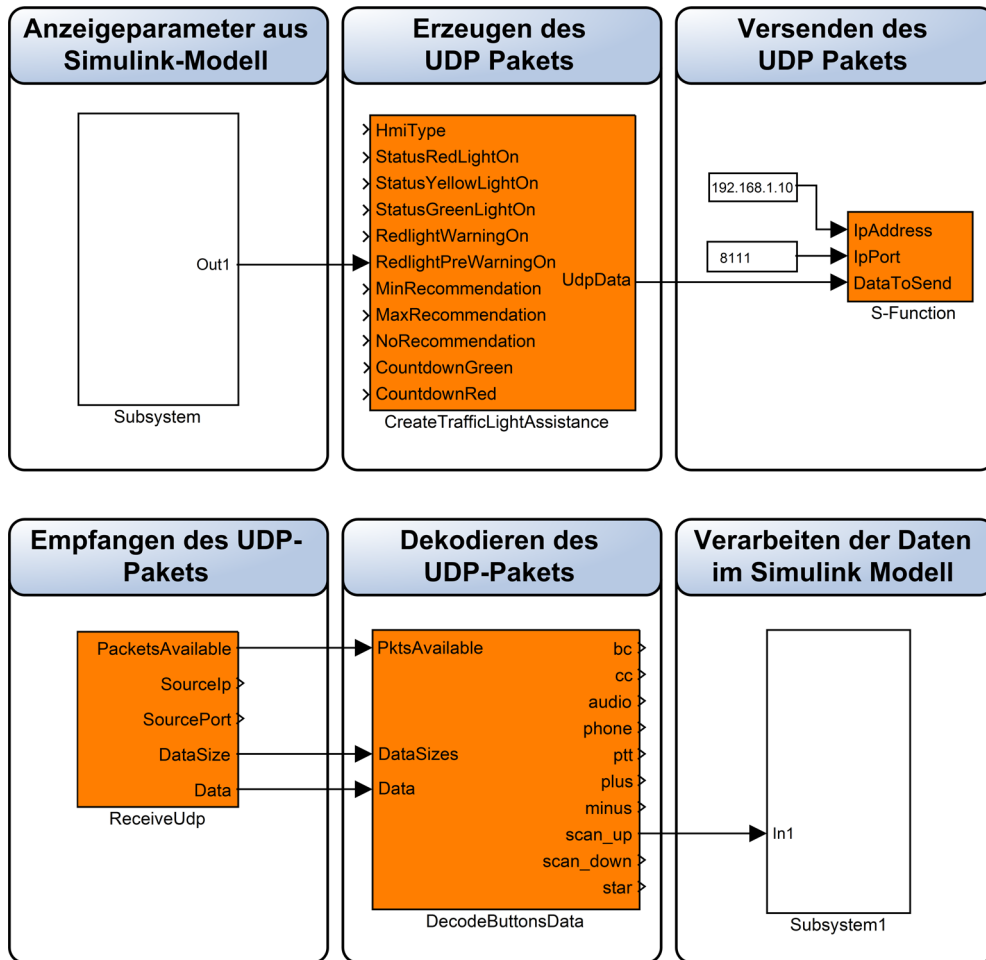
<sup>11</sup><http://www.dspace.de/ww/de/gmb/home/products/sw/expsoft/contrdes.cfm>



**Abbildung 2.15:** Im Rahmen der Arbeit entwickeltes MMI-Framework zur Darstellung von Fahrerassistenz-Anzeigen

auf einem Windows-Rechner, in der linux-basierten Fahrsimulation oder der Echtzeitumgebung auf der dSPACE Box notwendig. Mit Hilfe eines UDP-Receive Blocks und unterschiedlicher Dekodierungs-Blöcken können Bedienrückmeldungen an das Simulink-Modell übermittelt und dort verarbeitet werden.

Das hier umgesetzte Verfahren der modellgetriebenen Softwareentwicklung (Stahl u. a., 2007) erleichtert die tägliche Arbeit der Ingenieure und erlaubt eine schnellere Umsetzung neuer Anforderungen an das Anzeige-System.



**Abbildung 2.16:** Automatisiert generierte Simulink-Blöcke/S-Functions zur Enkodierung bzw. Dekodierung von UDP-Paketen





# MENSCH-MASCHINE-SCHNITTSTELLEN FÜR FAHRERASSISTENZSYSTEME

---

Systeme, die den Fahrer durch Information oder eine Warnung unterstützen (vgl. Abschnitt 2.3.2), können nur dann einen Nutzen erbringen, wenn sie eine auf die menschlichen Bedürfnisse zugeschnittene Mensch-Maschine-Schnittstelle besitzen. Dieses Kapitel fasst wichtige Grundlagen und Forschungsarbeiten zur Gestaltung von Warnmeldungen und zur Informationspräsentation zusammen.

## 3.1 Warnende Fahrerassistenz

In der Luftfahrt gibt es eine lange Historie in der Entwicklung von Warnsystemen. Bereits im Jahre 1949 wurde ein System, das den Piloten vor einem drohenden Strömungsabriss warnt (*Stall Warning*), patentiert (Greene, 1949) und in ersten Flugzeugen verbaut. Später kamen Systeme hinzu, die Warnungen bei Unterschreiten einer sicheren Flughöhe (*GPWS - Ground Proximity Warning System*) oder einer drohenden Kollision mit anderen Flugzeugen ausgeben (*TCAS - Traffic Alert and Collision Avoidance System*). Forschungsergebnisse im Bereich der Luftfahrt lassen sich teilweise auf Straßenfahrzeuge anwenden. Eine uneingeschränkte Wiederverwendung der Ergebnisse scheitert jedoch an den stark unterschiedlichen Rahmenbedingungen. Ein Flugzeug lenken hoch trainierte und gut geschulte Piloten, die auf viele verschiedene Zwischenfallszenarien vorbereitet werden. Dies liegt auch in der wesentlich höheren Verantwortung begründet, die die Piloten bei der Kontrolle eines voll besetzten Reiseflugzeugs oder eines mit Waffen bestückten Kampfflugzeugs übernehmen. Umgekehrt sind die Reaktionszeiträume auf Warnungen in Flugzeugcockpits oft wesentlich größer als in Autos. Beispielsweise liegt die Warnschwelle für ein TCAS System abhängig von der Flughöhe zwischen 15 und 35 Sekunden vor dem potenziellen Zusammenstoß (Federal Aviation Administration, 2000). Bei einem Auffahrwarnsystem im Fahrzeug hingegen bleiben dem

Fahrer zwei bis drei Sekunden bis zum potenziellen Aufprall. Die Gestaltung von Warnungen und insbesondere die Integration mehrerer Warnsysteme erfordert Wissen über die menschliche Fähigkeit, in bestimmten Situationen auf Signale bzw. Stimuli zu reagieren. Hier lassen sich Parallelen zwischen dem Straßenverkehr und der Luftfahrt oder auch dem Schienen- und Schiffsverkehr ziehen.

### 3.1.1 Bestandteile einer Warnmeldung

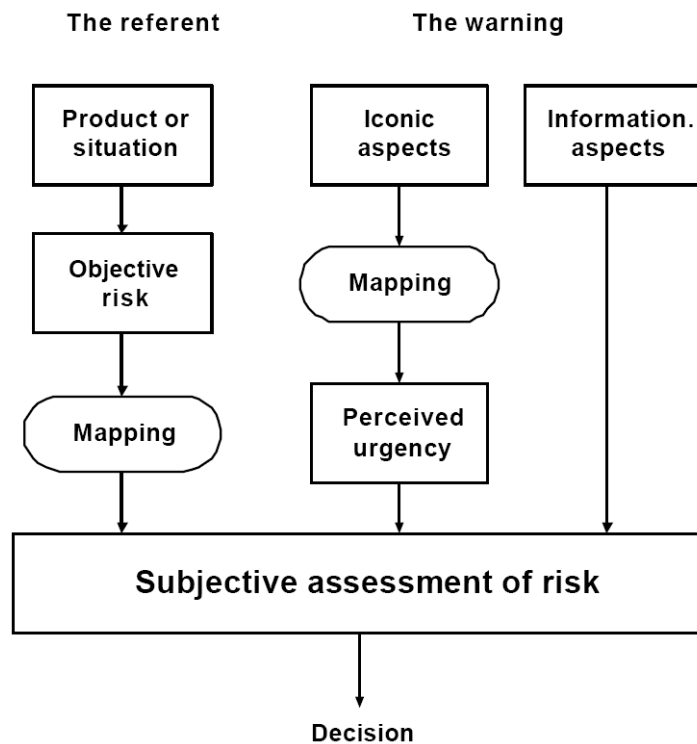
Nach Edworthy und Adams (1996) ist eine Warnung ein rein künstlich geschaffenes Konstrukt, das nur im Kontext mit einem Bezugsobjekt oder einer Situation existieren kann. Eine Warnung soll dem Fahrer helfen, die Gefährlichkeit einer Situation besser einschätzen zu können. Die durch die Warnung transportierten Informationen fließen neben den direkten Wahrnehmungen des Menschen in den Entscheidungsprozess, ob der Aufforderung gefolgt werden sollte, mit ein (*warning compliance*, siehe Abbildung 3.1).

Edworthy und Adams zerlegen eine Warnung in zwei Bestandteile:

**Iconic Aspects** Zunächst muss der Mensch in der Lage sein, die Warnung wahrzunehmen und dazu muss diese bestimmte Kriterien erfüllen. Beispielsweise muss eine optische Warnung im Sichtfeld des Fahrers präsentiert werden und eine bestimmte Größe haben oder eine akustische Warnung laut genug sein, um vorhandene Umgebungsgeräusche zu übertönen. Diese bildhaften Aspekte (*iconic aspects*) einer Warnung können eine abstrakte Gestalt haben und hängen nicht notwendigerweise mit dem Grund der Warnung zusammen oder lassen Rückschlüsse auf diesen zu. Die Verarbeitung dieser Eigenschaften einer Warnung durch den Menschen erfordert nur wenig mentale Ressourcen.

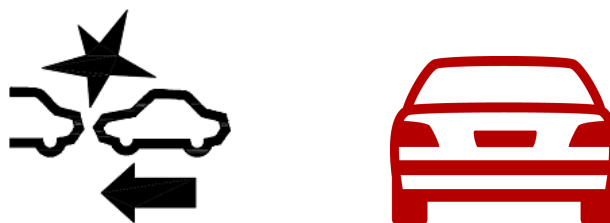
**Informational Aspects** Zusätzlich zur reinen Alarmfunktion einer Warnung können mit dieser weitere Informationen verknüpft sein. Beispielsweise der Grund für die Warnung, die Konsequenzen, wenn auf die Warnung nicht reagiert wird oder weitergehende Handlungsempfehlungen.

Der Informationsgehalt der Warnung ist nur *eine* Eingangsgröße für den Entscheidungsprozess, ob auf eine Warnung reagiert wird (Abbildung 3.1). Es ist daher denkbar, dass der Informationsgehalt der Warnung reduziert werden kann, wenn der Kontext, in dem die Warnung ausgegeben wird, bereits Rückschlüsse auf den Warngrund, die Konsequenzen bei Nichtbefolgen und die Handlungsempfehlung erlaubt. Als Beispiel soll hier eine Auffahrwarnung in einem Fahrzeug dienen. Campbell u. a. (2004) weisen in einem Fragebogentest nach, dass das ISO-Symbol für Auffahrwarnungen (siehe Abbildung 3.2) im Vergleich zu anderen Warnsymbolen am besten mit der entsprechenden Situation assoziiert wird. Diese Labor-Untersuchung berücksichtigt jedoch nicht den Kontext, in dem sich der Fahrer während einer solchen Warnung befindet. Ein abgelenkter Fahrer wird seine Aufmerksamkeit aufgrund der Warnung auf die Straße richten. Im Falle einer berechtigten Auffahrwarnung wird der Fahrer beispielsweise ein verzögerndes Vorderfahrzeug erkennen und eine Notbremsung einleiten. Die Reize, die er visuell durch die Windschutzscheibe des Fahrzeugs wahrnimmt, wiegen



**Abbildung 3.1:** Subjektive Entscheidung einer Warnung zu folgen (*warning compliance*) aus Edworthy und Adams (1996)

mit Sicherheit stärker, als der Informationsgehalt der Warnung. Auch aus diesem Grund wird beim BMW Auffahrwarnsystem nicht das ISO Symbol, sondern ein wesentlich abstrakteres Symbol verwendet (Abbildung 3.2). Lange u. a. (2008) schlugen deshalb eine Untersuchung mittels einer Videopräsentation vor, die dem Probanden den entsprechenden Kontext bietet und so eine gesamtheitliche Evaluierung des Verständnisses der Warnung ermöglicht. Im Falle von Warnsystemen reicht eine Präsentation einer gefahrlosen Fahrszene nicht aus (wie z.B. in Doisl, 2004). Hier schließt der Kontext vor allem auch die Gefahrensituation mit ein (z.B. stark verzögerndes Vorderfahrzeug).



**Abbildung 3.2:** ISO Auffahrwarnsymbol (links) und BMW Auffahrwarnsymbol (rechts)

### 3.1.2 Subjektive Risikobewertung

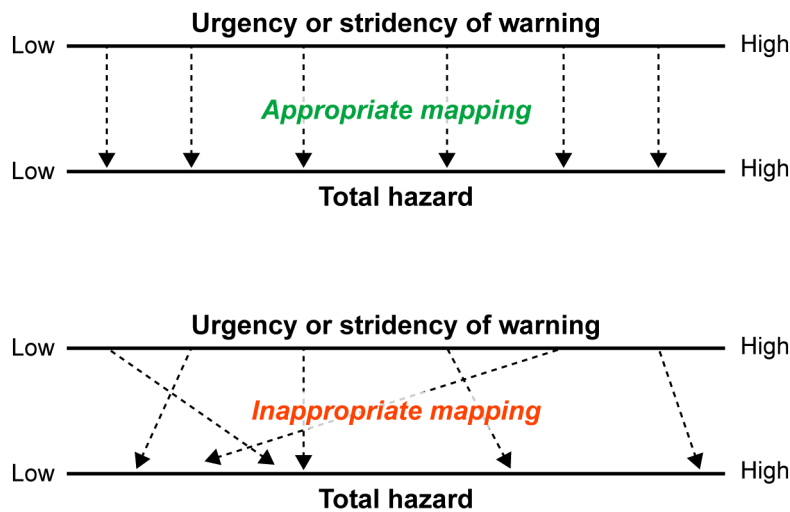
Nach Edworthy und Adams (1996) nutzt der Mensch in einer Warnsituation drei verschiedene Eingangsgrößen, um das Risiko nach subjektiven Kriterien zu bewerten: Die Situation selbst (z.B. die aktuelle Verkehrssituation), die bildhaften Eigenschaften der Warnung (*iconic aspects*) und die mit der Warnung assoziierten Informationen (*informational aspects*, siehe Abbildung 3.1). Während der Informationsteil direkt in die subjektive Bewertung des Risikos einfließt (*subjective assessment of risk*), erfordern die beiden anderen Größen eine Abbildung (*mapping*).

Ein Fahrerassistenzsystem sollte in der Lage sein, das objektive Risiko in einer Situation zu ermitteln. Hier fließen Kenngrößen der Fahrphysik und das damit prädierte zeitliche Verhalten verschiedener Verkehrsteilnehmer ein. Idealerweise stimmen das objektive Risiko und das subjektive Risikoempfinden des Fahrers in einer Warnsituation überein. Bei Systemen, die beispielsweise vor Gefahren warnen, die für den Fahrer zum Zeitpunkt der Warnung nicht sichtbar sind (z.B. Querverkehr hinter Sichtverdeckung), wird dieser Abgleich zwischen objektivem und subjektiv erlebtem Risiko nur schwer möglich sein. Die Wahrscheinlichkeit, dass in einer solchen Situation auf eine Warnung reagiert wird, ist damit entsprechend gering.

Die *Iconic Aspects* einer Warnung führen zu einer wahrgenommenen Dringlichkeit einer Warnmeldung (*perceived urgency*). Die wahrgenommene Dringlichkeit sollte mit der Gefahr, die von einer Situation ausgeht, korrelieren (siehe Abbildung 3.3). Das heißt, wenn ein hohes Risiko besteht, sollte die Dringlichkeit auch entsprechend hoch sein und über den gesamten Bereich konsistent abgebildet werden. Einfluss auf die wahrgenommene Dringlichkeit können bei visuellen Warnungen beispielsweise die Größe oder die Farbe eines Symbols haben. Bei auditiven Warnungen sind unter anderem die Tonhöhe oder die Lautstärke relevant. Hellier u. a. (1993) und Marshall u. a. (2007) untersuchen beispielsweise den Einfluss verschiedener Ton-Parameter auf die empfundene Dringlichkeit von akustischen Warnmeldungen. Lindberg u. a. (2009) ermitteln mit Hilfe von Probandenversuchen ein schlüssiges Warnkonzept für verschiedene Assistenzsysteme zur Unterstützung der Querführung des Fahrzeugs. Hier zeigt sich, dass die Fahrer zwischen verschiedenen hohen Gefährdungsgraden unterscheiden und dass diese Abstufungen vom Warnsystem entsprechend widergespiegelt werden sollten (z.B. *Spurverlassen* versus *Fahrbahnverlassen*).

### 3.1.3 Mögliche Fehlfunktionen und deren Auswirkungen

Warnsysteme haben den Vorteil, dass sie den Fahrer nicht von der Fahraufgabe entbinden und so die potenziellen negativen Effekte eines automatisierten Systems vermeiden (siehe Abschnitt 2.3.1). Da ein Warnsystem nicht direkt in die Fahrzeugführung eingreift, bleibt die Entscheidung zu reagieren beim Fahrer. Nur so lässt sich der Einsatz eines Systems, das nicht in allen Situationen absolut fehlerfrei arbeitet, verantworten. Die Toleranz gegenüber Fehlfunktionen von Warnsystemen ist allerdings beschränkt. Bei zu hoher Fehlwarnrate tendieren



**Abbildung 3.3:** Abbildung zwischen der Dringlichkeit einer Warnung und der Gefahr in einer Situation nach Edworthy und Adams (1996)

Menschen dazu, solche Alarmer abzuschalten oder zu ignorieren. Dieses Verhalten beschreibt Breznitz (1984) als *Cry Wolf Syndrome*. Darüber hinaus wirkt sich eine schlechte Systemqualität auch auf die Reaktionszeit aus. Getty u. a. (1995) weisen nach, dass die Probanden für unterschiedliche Fehlwarnraten jeweils angepasste Reaktionsstrategien wählen. Bei höherer Fehlwarnrate stellt sich mit der Zeit eine längere Reaktionszeit auf die Warnungen ein.

Durch den Einfluss von Fehlwarnungen kann die anfänglich positive Wirkung eines Warnsystems während einer längeren Nutzung teilweise verloren gehen. Pritchett und Hansman (1997) untersuchen die Reaktion auf Kollisionswarnungen im Flugzeug und nennen drei Gründe, die einen Piloten von einer Befolgung einer entsprechenden Warnung abhalten können:

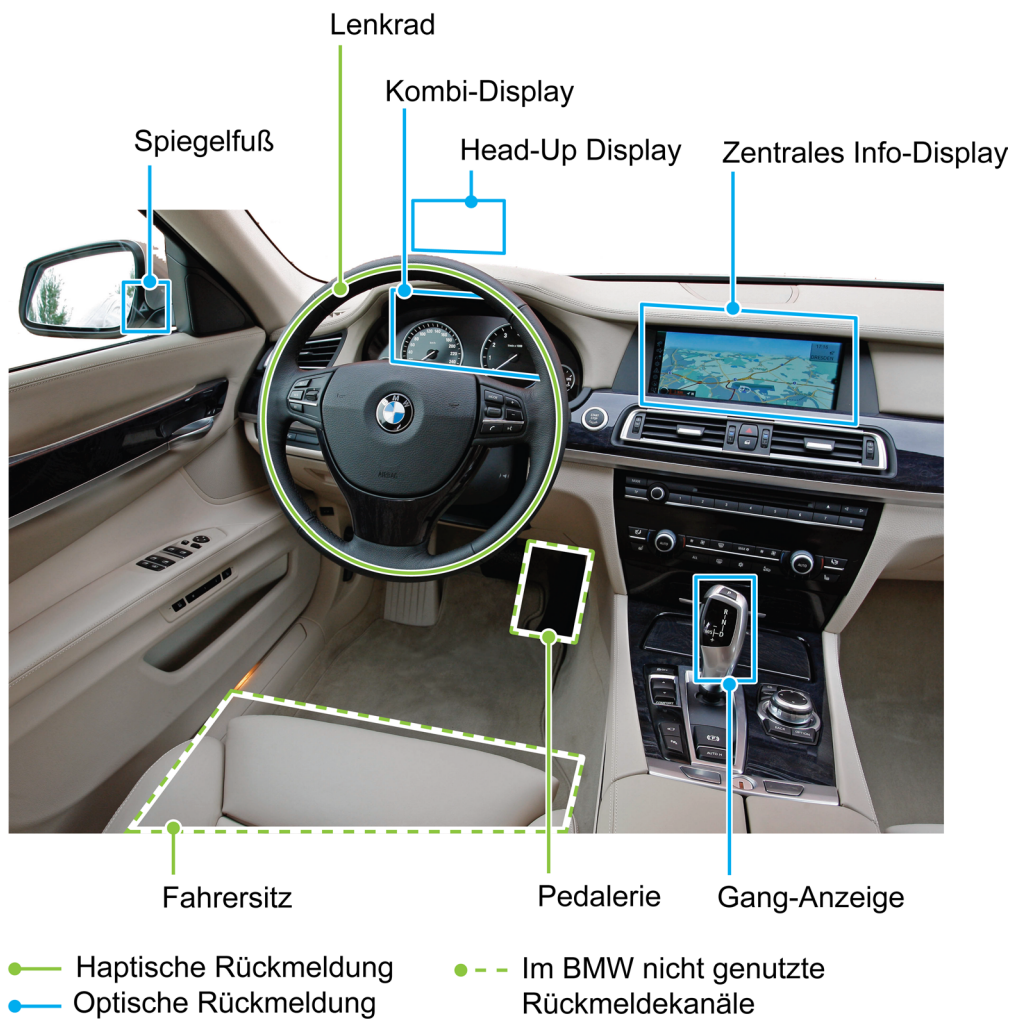
- Der Pilot zweifelt die einwandfreie Funktion des Warnsystems an
- Der Pilot geht davon aus, dass dem Warnsystem nicht alle Informationen für eine korrekte Situationsinterpretation zur Verfügung stehen
- Der Pilot vertraut seinen eigenen Entscheidungen mehr als denen des Warnsystems

Für einen Fahrer in einem Fahrzeug gelten identische Überlegungen.

Neben diesen Langzeiteffekten können Warnmeldungen auch kurzfristig negative Auswirkungen haben. Muigg u. a. (2008) weisen nach, dass eine akustische/optische Warnmeldung unabhängig von der Verkehrssituation teilweise zu erheblichen Blickabwendungszeiten von der Straße auf das Kombiinstrumentendisplay führt. Eine Warnmeldung zum falschen Zeitpunkt kann so zu einer geringeren Reaktionsgüte führen (z.B. Reaktionszeit oder Art der Reaktion).

### 3.1.4 Ausgabemodalitäten

Für die Ausgabe von Warnungen können verschiedene Modalitäten verwendet werden. Die meisten Forschungsarbeiten konzentrieren sich auf optische, akustische und haptische Warnausgaben.



**Abbildung 3.4:** Mögliche Orte für optische und haptische Rückmeldungen an den Fahrer am Beispiel des BMW 7er

#### Visuell

Wurden visuelle Warnmeldungen früher meist über Kammerleuchten ausgegeben, so stehen in heutigen Fahrzeugen meist frei programmierbare Multifunktionsdisplays zur Verfügung. Anzeigen in Fahrzeugen müssen bestimmte



ergonomische Kriterien erfüllen (Kontrast, Größe, Symbole, etc.), die in verschiedenen Standards festgelegt sind (z.B. ISO 15009, 2003 oder ISO 2575, 2000).

Das Kombiinstrumentendisplay, als klassischer Anzeigort für Warnmeldungen, wird heute in einigen Fahrzeugen durch ein zusätzliches Headup Display ergänzt (siehe Abbildung 3.5a). Das virtuelle Bild liegt hier in geringerem Winkelabstand zur normalen Sichtlinie des Fahrers und die Entdeckungswahrscheinlichkeit von Anzeigen ist dementsprechend höher (Yoo u. a., 1999).

Darüber hinaus gibt es Bestrebungen, Warnmeldungen direkt mit dem Bezugsobjekt, also dem Grund für die Warnung zu verknüpfen. Beispielsweise nutzen einige Fahrzeughersteller eine LED im Fuß des Außenspiegels um den Fahrer im Fall eines Spurwechsels vor einer drohenden Kollision mit einem sich schnell nähernden Fahrzeug zu warnen (siehe Abbildung 3.5b). Die visuelle Aufmerksamkeit des Fahrers wird so an die Stelle gelenkt, an der auch das potenzielle Konfliktobjekt zu sehen ist. *Kontaktanaloge* Head-up-Displays machen sich dieses Prinzip zu nutze, indem sie einen räumlichen Bezug zwischen den Darstellungen im Head-up-Display und der Außenwelt herstellen. Kontaktanaloge Displays überlagern Elemente der realen Welt, wie sie der Fahrer wahrnimmt, mit zusätzlichen Anzeigen (z.B. Bubb, 1975, Bergmeier und Bubb, 2008 oder Tönnis u. a., 2006). Plavšić u. a. (2009) nutzen beispielsweise eine kontaktanaloge Darstellung im Fahr Simulator um den Fahrer vor verdeckten Verkehrsteilnehmern zu warnen (Abbildung 3.5c). Gerade für kommunikationsbasierte Fahrerassistenzsysteme, die auch potenzielle Gefahren ohne direkte Sichtverbindung detektieren können, ist ein solcher Ansatz interessant.

#### Auditiv

Da die Fahraufgabe visuell geprägt ist, werden ebenfalls visuelle Warnmeldungen vom Fahrer in manchen Situationen weniger häufig oder zu spät entdeckt. Die Kombination mit einer akustischen Meldung, die die Alarmfunktion der Warnung übernimmt, kann diesen Nachteil ausgleichen. Da eine akustische Warnung in der Regel für alle Personen im Fahrzeug hörbar ist, birgt diese jedoch die Gefahr einer Bloßstellung des Fahrers. Ebenso ist die Belästigung des Fahrers im Falle einer Fehlwarnung deutlich höher.



Akustische Warnmeldungen können unterschiedlich ausgeprägt sein:

**Abstrakter Ton** Ein abstrakter Ton oder eine Tonfolge lassen zunächst keinen Rückschluss auf den Grund der Warnung zu, zumindest bei untrainierten Personen. Allerdings lassen sich durchaus Abstufungen im subjektiven Empfinden der Dringlichkeit durch Variation verschiedener Tonparameter erreichen (Marshall u. a., 2007). Über *Spatial Audio Displays* kann zusätzlich die Richtung einer potenziellen Gefahr transportiert werden (McAnally und Martin, 2007). In Kapitel 5 dieser Arbeit wird der Nutzen räumlich gerichteter, abstrakter Warntöne für Warnungen im Kreuzungsbereich untersucht.



(a) Ausgabe einer visuellen Warnung im Kombiinstrumenten-Display und Head-up-Display (BMW Pressclub, 2008)



(b) Spurwechselwarnung im BMW 7er: LED im Spiegelfuß und Lenkradvibration (BMW Pressclub, 2008)



(c) Kontaktanaloge Warnung vor einem verdeckten Verkehrsteilnehmer (Plavšić u. a., 2009)

**Abbildung 3.5:** Beispiele für visuelle Warnungen im Auto

**Auditory Icon** Die Verwendung von natürlichen Geräuschen aus dem alltäglichen Leben, ermöglicht ein besseres Verständnis einer akustischen Meldung auch ohne vorheriges Training. Perry u. a. (2007) untersuchen beispielsweise die Verwendung verschiedener Auditory Icons im Flugzeug und stellen eine bessere Erlernbarkeit und eine beschleunigte Reaktion fest. Fricke u. a. (2006) weisen bei der Verwendung von Auditory Icons (wie z.B. Fahrradklingel, Reifenquietschen) im Auto bessere Identifikationsraten nach. Die Gefahr beim Einsatz von Auditory Icons ist jedoch, dass diese neben der recht guten Erkennungsleistung auch eine trainierte oder schreckhafte Reaktion hervorrufen, die nicht an die aktuelle Situation angepasst ist.

**Sprache** Die Ausgabe von Sprache ist bisher vor allem im Flugzeug verbreitet (*Voice Warning System, VWS*). Das Traffic Alert and Collision Avoidance System (TCAS) fordert den Piloten beispielsweise durch die synthetische Ausgabe der Wörter „Climb, Climb“ zu einer Steigerung der Flughöhe auf (Federal Aviation Administration, 2000).



## Haptisch

Für die Übermittlung von Warnmeldungen an den Fahrer sind vor allem die taktile sowie kinästhetische Wahrnehmung als Teil der haptischen Wahrnehmung geeignet. In einigen Fahrzeugen werden Lenkradvibrationen (Ehmanns u. a., 2008; Vukotich u. a., 2008) oder ein leichtes Gegenmoment am Lenkrad (Lexus-Europe, 2008) verwendet, um den Fahrer vor einem Verlassen der Spur zu warnen. Die Beaufschlagung der Lenkung mit künstlichen Drehmomenten kann zu ungewollten Effekten führen, wenn der Fahrer diese Rückmeldungen als Störung interpretiert (z.B. Seitenwind oder Spurrillen) und reflexartig versucht diese zu kompensieren. Deshalb sollte die Ausgabe in Kombination mit einer optischen oder akustischen Warnung erfolgen.



Ein leichtes und kurzzeitiges Verzögern des Fahrzeugs kann ebenfalls als Warnausgabe verwendet werden (*Anbremsen*). Dies hat zusätzlich den Vorteil, dass bereits während der Warnung Geschwindigkeit abgebaut und so die Zeit bis zum potenziellen Unfall erhöht wird. So vergrößert sich die verbleibende Reaktionszeit für den Fahrer (vgl. z.B. Klanner, 2008).

Flemisch u. a. (2003, 2005) entwickelten eine ausschließlich auf haptischen Rückmeldungen basierende Interaktionsmetapher für automatisierte Fahr- und Flugzeuge. Die sog. *Horse Metapher (H-Metapher)* vermittelt dem Fahrer die Grenzen des sicheren Fahrzustands über Krafrückmeldungen an den Stellteilen. Allerdings handelt es sich nicht um ein reines Warnkonzept, da die Metapher dem Fahrzeug eine vorausschauende, dem Pferd nachempfundene, Verhaltensweise zuspricht. Es kommt im besten Fall erst gar nicht zu einer kritischen Situation, die die Ausgabe einer kurzfristigen Warnung erfordert.

Fitch u. a. (2007a,b) untersuchen die Wirkung eines haptischen Fahrersitzes, der die Richtung einer potenziellen Gefahr durch die Vibration verschiedener Teile der Sitzfläche kommuniziert (siehe Abbildung 3.6). In einem Fahrsimulatorexperiment konnte nachgewiesen werden, dass die Probanden durch die Verwendung des haptischen Sitzes häufiger die richtige Richtung (aus der die Gefahr kommt) nennen konnten und ihnen dies zusätzlich schneller möglich war. Als Vergleichsmaß diente eine gerichtete akustische Meldung. Die Aufdringlichkeit solcher Sitzvibrationen ist jedoch hoch und die Akzeptanz möglicherweise gering.

### 3.1.5 Interferenz von Warnmeldungen

Die Verkehrssituation kann es erfordern, zwei Warnungen in kurzer Abfolge auszugeben. Bereits in den fünfziger Jahren wurde von Welford (1952) (zitiert nach Pashler, 1992 und Wickens und Hollands, 1992, Kap. 9) der Begriff der *Psychologischen Refraktärperiode* geprägt und nachgewiesen, dass die Reaktion auf einen Reiz verlangsamt ist, wenn ein zweiter Reiz kurz nach dem ersten präsentiert wird. Abbildung 3.7 auf Seite 49 zeigt den Zusammenhang zwischen dem zeitlichen Abstand der beiden Reize und der resultierenden Reaktionszeit auf den zweiten Reiz. Es zeigt sich, dass die Reaktionszeit bei kürzer werdender Abfolge der beiden Reize stark ansteigt. Dieser Effekt konnte auch in einem Fahrsimulationsexperiment

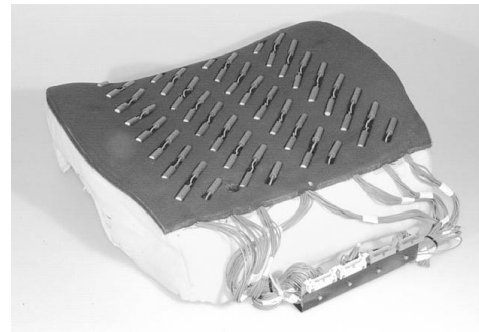
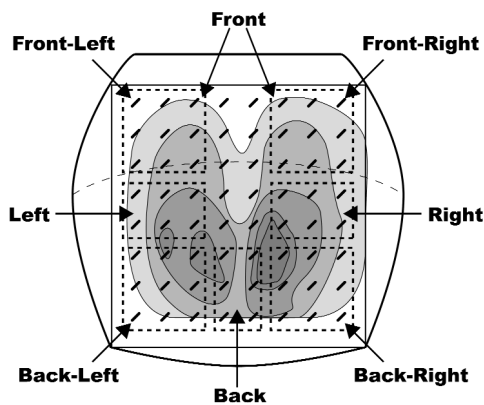


Abbildung 3.6: Haptischer Fahrersitz aus Fitch u. a. (2007a)

von Lermer und Schuhmann (2007) nachgewiesen werden. Hier wurde von den Probanden eine nahezu gleichzeitige Reaktion auf eine fahrzeugeigene Störungsmeldung (*BMW Check Control Meldung*) und einer Auffahrwarnung verlangt. Die Probanden reagierten auf die akustische Auffahrwarnung langsamer, wenn kurz davor eine, ebenfalls akustische, Störungsmeldung ausgegeben wurde.

Durch eine Diskrepanz zwischen physikalischer und durch den Fahrer subjektiv empfundenen Gleichzeitigkeit können ebenfalls Probleme bei der Interpretation von Warnungen auftreten. Das Konzept der *präsemantischen Integration* (Pöppel, 2002) legt nahe, dass das Gehirn Informationen innerhalb eines Drei-Sekunden Fensters automatisch und unbewusst integriert und so die *subjektive Gegenwart* bildet. Angewendet auf Warnausgaben im Fahrzeug kann dies bedeuten, dass der Fahrer Warnungen, die innerhalb eines solchen Zeitfensters ausgegeben werden, nicht getrennt wahrnimmt.

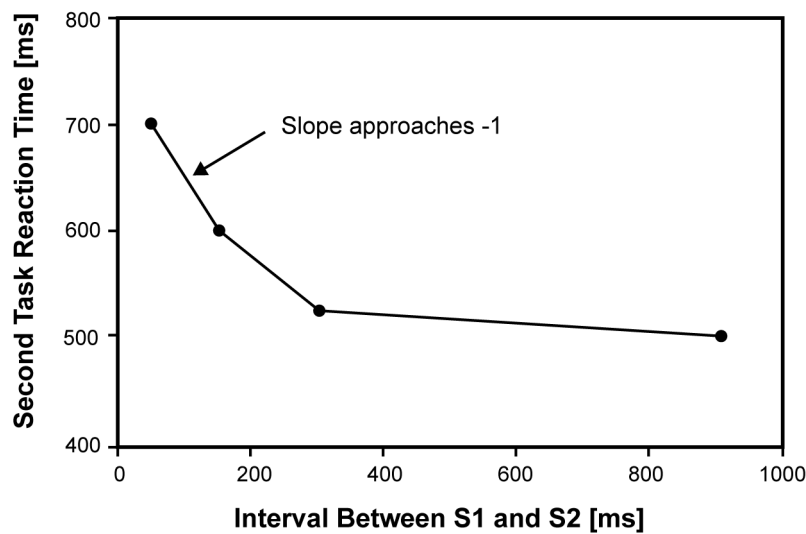
Diese Ausführungen zeigen die Notwendigkeit, Warnungen im Fahrzeug zu integrieren oder aufeinander abzustimmen.

### 3.1.6 Integration von Warnmeldungen

Arbeiten mehrere Warnsysteme unkoordiniert und unabhängig voneinander in einem Fahrzeug, so können unter Umständen Konflikte bei der Ausgabe von Warnungen auftreten. Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten mit Konflikten umzugehen:

**Konfliktvermeidung** Manche Konflikte sind bereits während der Entwicklungsphase vermeidbar. Beispielsweise können die Warnsysteme für disjunkte Mengen von Verkehrssituationen ausgelegt sein, sodass nahezu gleichzeitige Meldungen nicht auftreten.

Mehrere Warnausgaben können aber auch unterschiedliche Modalitäten nutzen, um eine Überlagerung von zwei gleichzeitigen Meldungen auszuschließen. Dieser Ansatz ist auch aus ergonomischen Gesichtspunkten vertretbar, denn die *Multiple Ressource*



**Abbildung 3.7:** Verzögerte Reaktionszeit auf zweiten Reiz nach Welford (1952)

*Theory* (Wickens und Hollands, 1992, Kap. 11) sagt aus, dass Reize unterschiedlicher Modalität schneller verarbeitet werden können als Reize gleicher Modalität. Dies untermauert auch die Untersuchung von Lermer und Schuhmann (2007). Hier reagierten Probanden auf zwei kurz aufeinander folgende akustische Warnungen im Fahrzeug verzögert. Wurde die Übermittlung einer der Warnungen auf den haptischen Kanal verschoben, so war kein negativer Effekt nachweisbar.

Zur konfliktfreien Präsentation verschiedener visueller Warnungen werden in Flugzeugen integrierte Warnanzeigen verwendet. Im *Engine Indication and Crew Alerting System* (EICAS) erhält der Pilot alle für den sicheren Betrieb des Flugzeugs nötigen Informationen und Warnmeldungen (siehe Abbildung 3.8). Diese Anzeige ersetzt den Bordingenieur, der früher für die Überwachung der Betriebszustände der verschiedenen Komponenten verantwortlich war. In Ververs u. a. (2002) und Dorneich u. a. (2001) wird ein ähnlicher Ansatz für die Integration aller Informationen und Warnungen, die sich auf Gefahren *außerhalb* des Flugzeugs beziehen, verfolgt. Die schnelle und richtige Interpretation solcher Anzeigen erfordert ein vorheriges Training. Für den Einsatz in normalen Straßenfahrzeugen ist die Komplexität zu hoch. van Gijssel u. a. (2007) schlagen eine stark vereinfachte Darstellung für das Head-up-Display eines Fahrzeugs vor. Verschiedene Segmente einer kreisförmigen Anzeige korrespondieren mit den entsprechenden Richtungen um das Fahrzeug herum (aus Fahrersicht, siehe Abbildung 3.9). Hält sich in einem Sektor ein Gefahrenobjekt auf, so wird das entsprechende Segment in der Anzeige hervorgehoben.

Es ist fraglich, ob der Fahrer aus zwei kurz aufeinanderfolgenden Warnungen einen Nutzen zieht, auch wenn diese durch die genannten Maßnahmen konfliktfrei präsentiert werden können. Die Wahrscheinlichkeit, dass sich die zeitliche Nähe der Ausgaben



**Abbildung 3.8:** Rockwell Collins EICAS-5000 (Engine Indication and Crew Alerting System, Rockwell Collins, 2008) im Detail und EICAS System in einer Dornier 328-110



**Abbildung 3.9:** Verschiedene Zustände der abstrakten Segmentanzeige im Head-up-Display aus van Gijssel u. a. (2007)

negativ auswirkt, ist hoch. Wenn die Verkehrssituation, in der die Warnungen auftreten, bereits ausreichend Hinweise auf den Grund der Warnungen enthält, so kann unter Umständen auf eine Unterscheidbarkeit und damit die separate Ausgabe der beiden Warnungen verzichtet werden. Es ist dann ausreichend, dass mit der Warnung die Aufmerksamkeit des Fahrers zurück auf die Straße gelenkt wird und der Fahrer eine passende Vermeidungsreaktion auswählt. Die Warnungen müssen dann keine Informationen über deren Ursprung enthalten und können von abstrakter Gestalt sein. Zwei abstrakte Warnungen in kurzem zeitlichen Abstand können damit zu einer Warnung zusammengefasst werden. So lässt sich ein Konflikt von zwei Warnmeldungen ausschließen. Ein solches Vorgehen wird beispielsweise von Cummings u. a. (2007) untersucht. Für die drei Systeme *Spurverlassenswarnung*, *Spurwechselwarnung* und *Auffahrwarnung* wurden in einer ersten Versuchsbedingung unterscheidbare Warnungen und in einer zweiten Bedingung eine einzelne abstrakte Warnung verwendet. In der Simulatorstudie konnten keine signifikanten Unterschiede in der Reaktionszeit und der Qualität der Reaktion zwischen den beiden Varianten (spezifisch vs. generisch) nachgewiesen werden. In Kapitel 4 wird für Kreuzungsassistenzsysteme eine ähnliche Strategie untersucht.

**Konfliktlösung** Werden Konflikte nicht durch entsprechende Maßnahmen während der Ent-

wicklung eines Fahrzeugs *vermieden*, so müssen diese während des Betriebs *gelöst* werden. Dies kann entweder durch den Fahrer selbst oder durch das Fahrzeug erfolgen. Wird der Fahrer in einer komplexen Verkehrssituation mit zwei (widersprüchlichen) Warnungen konfrontiert, kann dies zu einer langsameren oder weniger gut angepassten Reaktion führen (vgl. Abschnitt 3.1.5). Eine Konfliktlösung durch das Fahrzeug ist deshalb vorzuziehen, stellt aber hohe Anforderungen an die Qualität der Situationsinterpretation durch die Fahrzeugelektronik. Im AIDE-Projekt wird mit dem *Intelligent Communication Assistant (ICA)* (Kusmann u. a., 2006) eine Komponente entwickelt, die zunächst alle Meldungen von Fahrzeugsystemen an den Fahrer sammelt und dann aufgrund deren Wichtigkeit und der aktuellen Fahrsituation entscheidet, welche Meldungen an den Fahrer weitergegeben werden. Von Wolf u. a. (2005) wird ein Verfahren vorgeschlagen, das die Priorität von Meldungen durch einen paarweisen Vergleich aller möglichen Kombinationen von Warnausgaben ermittelt. Eine derart statische, bereits während der Entwicklung des Fahrzeugs festgelegte Priorisierungsmatrix ist jedoch nicht in der Lage auf Situationen zu reagieren, die vom Entwickler nicht berücksichtigt wurden. Eine Abdeckung aller möglichen Verkehrssituationen und Konstellationen ist bei der wachsenden Zahl an Warnsystemen nahezu unmöglich.

## 3.2 Informierende Fahrerassistenz

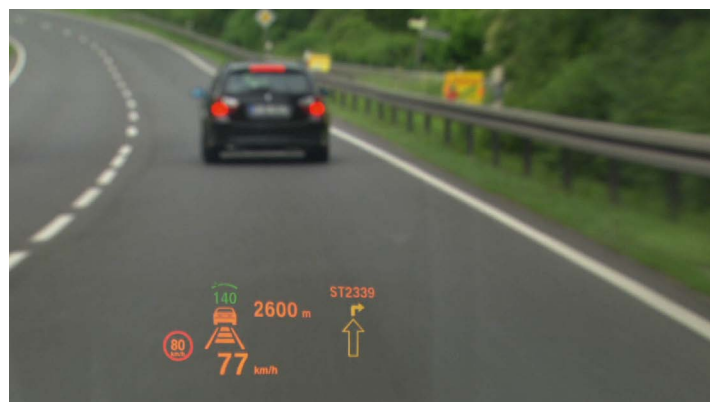
Stellt das Fahrzeug dem Fahrer kontinuierlich oder über eine längere Zeit vor einem Ereignis Informationen zur Verfügung, so wird dies in der vorliegenden Arbeit als *informierende Assistenz* betrachtet. Zur Informationspräsentation sind prinzipiell alle Modalitäten nutzbar, die Priorität liegt jedoch meist auf dem visuellen Kanal. Obwohl eine optische Rückmeldung am stärksten mit der visuell geprägten Fahraufgabe in Konflikt steht, hat diese den entscheidenden Vorteil, dass der Fahrer die Aufnahme der Informationen selbst steuern kann. Alle anderen Modalitäten haben einen wesentlich aufdringlicheren Charakter, d.h. der Fahrer kann sich den Meldungen nicht entziehen. Nachfolgend sollen einige bekannte Konzepte für die Informationspräsentation zusammengefasst und deren Eignung für die Kreuzungsassistenz beurteilt werden.

### 3.2.1 Visuelle Rückmeldungen

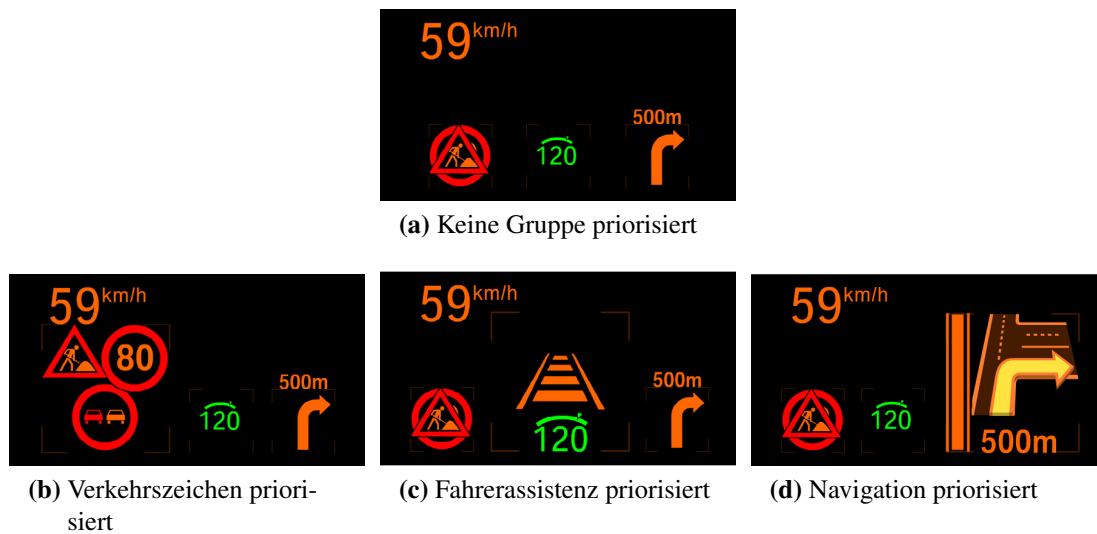
Mittlerweile haben sich Head-up-Displays in Fahrzeugen der Oberklasse als Technologie zur Informationspräsentation durchgesetzt und werden in den kommenden Jahren vermehrt in kleineren Fahrzeugklassen Einzug halten. Die zur Verfügung stehende Fläche für die Darstellung ist stark begrenzt und wird unter dem hohen Kostendruck bei kleinen Fahrzeugen weiter reduziert. Gleichzeitig sind heutige Autos in der Lage, dem Fahrer immer mehr relevante Informationen zu übermitteln. Mittlerweile umfasst das Informationsangebot unter anderem Geschwindigkeitsbegrenzungen, Navigationshinweise und den Zustand der Fahrerassistenzsysteme (siehe Abbildung 3.10). Da die Anzeigedichte nicht beliebig erhöht werden

kann, konzipiert Breisinger (2007) eine variable Darstellung mehrerer Informationsgruppen im Head-up-Display. Dabei wird das Prinzip des *Level of Detail* (Clark, 1976) aufgegriffen und auf das Head-up-Display angewendet (vergleiche auch DiVerdi u. a., 2004). Jede der drei Informationsgruppen *Verkehrszeichen*, *Fahrerassistenz* und *Navigation* ist im Normalzustand in einem geringen *Level of Detail* dargestellt (Abbildung 3.11a). Abhängig vom Verkehrsgeschehen und der Bedienung durch den Fahrer werden einzelne Gruppen vergrößert und in einer höheren Detailstufe präsentiert (siehe Abbildungen 3.11b bis 3.11d). Der Übergang zwischen den Detailstufen erfolgt dabei animiert in einer fließenden Bewegung. Der positive Effekt solcher Animationen auf die intuitive Verständlichkeit von Informationsanzeigen im Fahrzeug wurde auch von Broy (2007) nachgewiesen. Auslöser für die Priorisierung einer Gruppe kann beispielsweise ein kurz bevorstehender Abbiegevorgang oder ein neu erkanntes Verkehrszeichen sein. Für die Kreuzungsassistenz bietet dieser Ansatz das Potenzial, zusätzliche Informationen wie beispielsweise optimale Annäherungsgeschwindigkeiten nur dann einzublenden, wenn dies erforderlich ist. Im konventionellen Head-up-Display-Layout der aktuellen BMW 7er Reihe ist hingegen für jede Anzeige eine feste Position im Display vorgesehen. Die Probanden einer Simulatorstudie (Breisinger, 2007) empfanden die Priorisierung einzelner Informationsgruppen als hilfreich. Bedenken bezüglich der Ablenkung durch die Animationen von der Straße wurden – zumindest subjektiv – nicht geteilt.

Neben der Darstellung in klassischen Head-up-Displays bieten kontaktanaloge Head-up-Displays interessante Möglichkeiten zur Informationspräsentation. Zum einen liegt die Information im primären Sichtfeld des Fahrers und zum anderen kann die dargebotene Information direkt mit Objekten der realen Welt verknüpft werden. Ein häufiges Anwendungsfeld ist die Navigation (Abbildung 3.12a), aber auch die Unterstützung bei der Bahnführungsaufgabe ist denkbar. Tönnis u. a. (2006) bilden beispielsweise das Konzept des *Flugschlauchs* auf das Fahrzeug ab und zeigen dem Fahrer den prädierten Fahrschlauch und den bei der aktuell gefahrenen Geschwindigkeit notwendigen Bremsweg bis zum Stillstand (Abbildung 3.12b). Taya u. a. (2005) nutzen Bilder von Kameras im Kreuzungsbereich und blenden diese dem Fahrer ins Sichtfeld ein, um Sichtverdeckungen zu umgehen (Abbildung 3.12c).



**Abbildung 3.10:** Head-up-Display des BMW 7er (BMW Pressclub, 2008)



**Abbildung 3.11:** Aufteilung des Head-up-Displays in drei Gruppen aus Breisinger (2007)

Während die genannten Arbeiten die Anzeigen lediglich virtuell überlagern, gehen Melinghoff u. a. (2009) einen anderen Weg: Fußgänger, die ein Nachtsichtsystem im Fahrzeug erkennt, werden durch einen variablen Scheinwerfer hell erleuchtet und sind so für den Fahrer gut erkennbar (Abbildung 3.12d). Um den Fußgänger nicht zu blenden beschränkt sich die Beleuchtung auf den unteren Körperbereich.

### 3.2.2 Haptische Rückmeldungen

Neben der visuellen Übermittlung von Informationen bietet sich die Nutzung der Fahrzeugteile für haptische Rückmeldungen an den Fahrer an. Beispielsweise kann dem Fahrer über einen erhöhten Gegendruck im Gaspedal die Überschreitung der laut StVO zulässigen Höchstgeschwindigkeit mitgeteilt werden. Der Charme einer solchen Lösung liegt in der fehlenden visuellen Ablenkung und der für andere Mitfahrer unmerklichen Interaktion zwischen Fahrzeug und Fahrer. Allerdings ist der Eingriff in die Autonomie des Fahrers deutlich höher als bei einer unterschwellig visuellen Information. Lange u. a. (2006b) weisen einen positiven Einfluss des aktiven Gaspedals auf die Akzeptanz und das Fahrverhalten nach. Eine haptische Rückmeldung über das Gaspedal könnte einen unachtsamen Fahrer frühzeitig über eine rote Ampel oder eine zu beachtende Vorfahrt informieren. Eine unangenehme, kurzfristige akustische Warnung könnte dann unter Umständen entfallen.

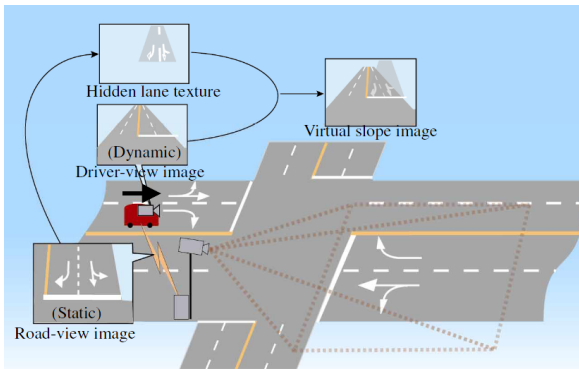
Die *H-Metapher* (Flemisch u. a., 2003, 2005) geht einen Schritt weiter und spricht dem Fahrzeug die Fähigkeit zu – ähnlich einem Pferd – eine sichere Fahrtrajektorie zu kennen (Abbildung 3.13). Eine Abweichung von dieser wird dem Fahrer über die Stellteile zurückgemeldet. Der Fahrer (Analogie *Reiter*) kann diese bis zu einem gewissen Grad übersteuern. Die *H-Metapher* ist ein vielversprechendes Konzept, setzt jedoch extrem hochentwickelte



(a) In der Fahrszene überlagerte Navigationshinweise (Sato u. a., 2006)



(b) Kontaktanaloge Anzeige des Bremswegs und des prädizierten Fahrschlauchs (Tönnis u. a., 2006)



(c) Überlagerung der realen Welt mit Kamerabildern (Taya u. a., 2005)

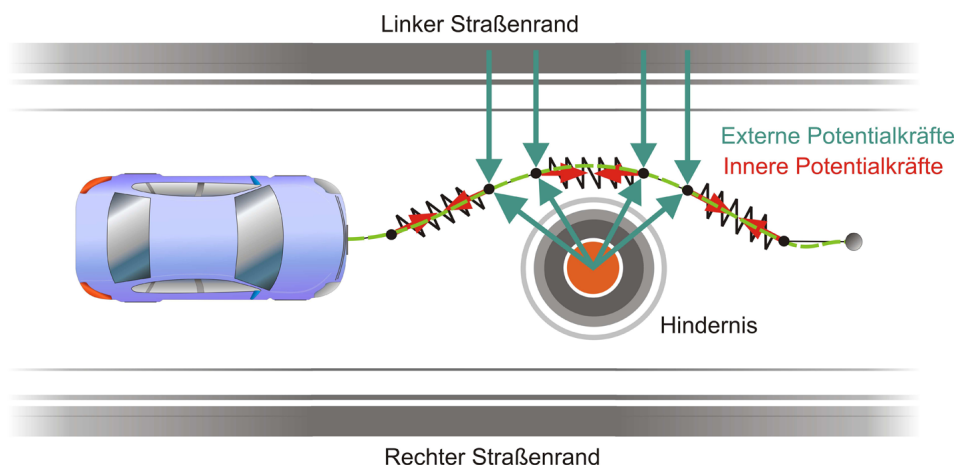


(d) Gezieltes Anleuchten von Fußgängern bei Nacht (Mellinghoff u. a., 2009)

**Abbildung 3.12:** Beispiele für kontaktanaloge Informationspräsentation im Fahrzeug



Sensorik und ein entsprechendes Wissensmanagement im Fahrzeug voraus. Teilaspekte der Metapher lassen sich auch bereits heute umsetzen. Das aktive Gaspedal zur Übermittlung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit, ist ein solcher Teilaspekt.



**Abbildung 3.13:** Bahnplanungsverfahren für Kraftfahrzeuge auf der Basis elastischer Bänder (Löper u. a., 2006)

# REDUKTION DES INFORMATIONSGEHALTS VISUELLER WARNUNGEN

---

Bisher gibt es meist eine feste Zuordnung zwischen einem Warnsystem und der entsprechenden Warnausgabe im Fahrzeug. Beispielhaft hierfür sind die gesetzlich vorgeschriebenen Warnleuchten (Rat der Europäischen Gemeinschaften, 1977) zur Anzeige kritischer Zustände verschiedener Fahrzeugsysteme. Dazu gehören die Warnung vor einem Anfahren mit angezogener Feststellbremse oder einer zu hohen Temperatur der Motor-Kühlfüssigkeit. Der Grund für die Warnmeldung erschließt sich dem Fahrer aus der Gestalt des Symbols. Die Standardisierung dieser Symbole und die Vermittlung während der Fahrausbildung führen dazu, dass die meisten Fahrer mit deren Bedeutung vertraut sind. Für Assistenzsysteme, die den Fahrer vor kritischen Situationen im Verkehrsgeschehen warnen, wird ebenfalls eine Standardisierung der verwendeten Symbole angestrebt (z.B. ISO Auffahrwarnsymbol, Abbildung 3.2 auf Seite 41). Warnungen von Assistenzsystemen dienen in erster Linie dazu, die Aufmerksamkeit des Fahrers auf eine bestimmte Verkehrssituation zu richten (z.B. stark bremsendes Vorderfahrzeug). Handelt es sich um eine gerechtfertigte Warnung, so sollte der Fahrer keine Schwierigkeit haben, den Grund der Warnung zu erkennen. Dies ist ein gravierender Unterschied zu Warnmeldungen die Fahrzeugsysteme betreffen. Denn um die Bedeutung einer Warnung bei kritischer Motortemperatur zu verstehen, steht dem Fahrer als Informationskanal ausschließlich das Symbol der Warnung selbst zur Verfügung (wenn man von bereits wahrnehmbaren Funktionsstörungen des Motors absieht). Die intuitive Verständlichkeit der Symbole spielt hier folglich eine größere Rolle.

Die Motivation für die Untersuchung des Informationsgehalts von Warnungen ist die Tatsache, dass der Fahrer in Zukunft immer mehr verschiedene Warnmeldungen von Assistenzsystemen verarbeiten müssen wird. Gleichzeitig sind die Warnungen dieser Assistenzsysteme immer spezifischer auf einzelne Verkehrssituationen zugeschnitten. Um die Interpretierbarkeit für den Fahrer sicherzustellen, müssen die Warnungen entsprechend aussagekräftig ge-

staltet sein. Damit wäre das ursprüngliche Ziel verfehlt, die Aufmerksamkeit des Fahrers auf die Straße zu lenken.

Das Zusammenfassen von Warnungen ist eine Möglichkeit, den Informationsgehalt zu reduzieren. Mehrere Warnsysteme teilen sich eine gemeinsame Warnausgabe. Diese Gruppierung zu übergeordneten Warnungen kann auf verschiedene Weisen erfolgen. Die zwei extremen Ansätze sind eine eins-zu-eins Beziehung zwischen System bzw. Verkehrssituation und Warnung (*spezifisch*) sowie eine vollständige Gruppierung aller Warnungen zu einer einzelnen Warnung (*generisch*, siehe Abbildung 4.1<sup>1</sup>).

Dazwischen spannt sich ein Spektrum verschiedener *Misch-Lösungen* auf. Exemplarisch seien die Folgenden erläutert:

**Gruppiert nach Richtung der Gefahr** Es gibt eine Warnung für jede Richtung, aus der eine potenzielle Gefahr für den Fahrer zu beachten ist. Es findet dabei keine Unterscheidung nach der Art der Gefahr statt (z.B. Fußgänger beim Abbiegen oder Fahrzeug im Toten Winkel). Dieser Ansatz wird in Kapitel 5 für akustische Warnungen untersucht.

**Gruppiert nach Ähnlichkeit** Die Warnungen werden aufgrund ihrer Bedeutung zusammengefasst. Alle Warnungen, die sich auf andere Fahrzeuge im Unkreis des eigenen Fahrzeugs beziehen, teilen sich dieselbe Warnausgabe. Eine Unterscheidung, um welche Art der Verkehrssituation es sich handelt, gibt es nicht (Auffahrwarnung oder Spurwechselwarnung). Als Beispiel sind die drei Gruppen *Fahrzeuge*, *verwundbare Verkehrsteilnehmer* (Fußgänger, Fahrradfahrer, etc.) und *Verkehrsregelungen* dargestellt.

**Gruppiert nach Handlungsaufforderung** Warnungen werden bezüglich der vorgeschlagenen Vermeidungsreaktion gruppiert. In den meisten Fällen wird dies Bremsen, Ausweichen oder eine Kombination aus beidem sein. Die Beeinflussung des Fahrers geht in diesem Fall noch einen Schritt über die reine Aufmerksamkeitssteuerung hinaus. Die Erkennung und die Beurteilung möglicher Handlungsalternativen in einer kritischen Situation ist für Fahrzeugsysteme allerdings eine weitaus kompliziertere Aufgabe als die Detektion von möglichen Konfliktobjekten. Es muss zusätzlich eine Abwägung der jeweiligen Konsequenzen für verschiedene Optionen erfolgen. Im schlimmsten Fall müsste das System Entscheidungen auf Basis ethischer Gesichtspunkte treffen. Der Fahrer wird zum Ausführenden degradiert. Der Sinn von Warnungen sollte jedoch sein, die mentalen Fähigkeiten des Fahrers zu nutzen und ihm die Auswahl einer geeigneten Reaktion zu überlassen.

Die Betrachtung der beschriebenen Varianten erfolgt in jeder Sinnesmodalität separat. Beispielsweise könnte eine generische visuelle Warnung mit einer richtungsbezogenen akustischen oder haptischen Warnung kombiniert sein. Im Rahmen dieser Arbeit sollen als erster

---

<sup>1</sup>Die in der Grafik verwendeten Symbole dienen lediglich der Illustration des abstrakten Integrations-Konzepts und stellen kein konkretes Anzeige-Konzept dar.



VRU: Vulnerable Road User

**Abbildung 4.1:** Verschiedene Integrationsstrategien für Warnungen

Schritt die Auswirkungen einer Informationsreduktion im visuellen Kanal untersucht werden. Es werden die zwei extremen Ausprägungen (*spezifisch* vs. *generisch*) hinsichtlich ihrer Tauglichkeit für die Kreuzungsassistenz anhand der folgenden zwei Kriterien verglichen:

**Verständlichkeit** Es soll geprüft werden, ob visuelle Warnungen von Kreuzungsassistenzsystemen vom Fahrer besser verstanden werden, wenn diese situationsspezifische Zusatzinformation enthalten.

**Reaktionsgüte** Das Verständnis einer Warnung alleine ist nicht ausreichend. Der Fahrer muss auch in der Lage sein, schnell zu entscheiden, ob die Warnung gerechtfertigt ist um ggf. eine passende Vermeidungsreaktion auszuführen. Es soll untersucht werden, inwieweit sich der Informationsgehalt der visuellen Warnung auf die Reaktionsgüte (hier Reaktionszeit) auswirkt.

Zu jedem der beiden Aspekte der Fragestellung wird jeweils ein Versuch durchgeführt (Abschnitte 4.3 und 4.4).

## 4.1 Motivation der Versuchsmethodik

Der Vergleich verschiedener Warnkonzepte unter der Annahme, dass das Verständnis der Warnung stark vom jeweiligen Fahrkontext abhängt, erfordert es, diesen Kontext im Versuchsaufbau nachzubilden. Dazu gehört die Fahrsituation (z.B. links abbiegen) und die in der Situation zu beachtenden Verkehrsteilnehmer (z.B. Fußgänger). Erhält der Fahrer in einer bestimmten Situation eine Warnung, so ist davon auszugehen, dass auch bei einer vorausgehenden Ablenkung ein ausreichend hohes Situationsbewusstsein vorhanden ist. Es ist schließlich kaum vorstellbar, dass der Fahrer derart lange abgelenkt ist, dass er keine Vorstellung von der momentanen Fahrsituation mehr hat. Eine Warnung wird beim Fahrer deshalb in den meisten Fällen zu einer gezielten Suchreaktion führen.

Eine Versuchsreihe im realen Straßenverkehr könnte die beste Realitätsnähe des Umfeldes garantieren, scheidet jedoch aufgrund der Kritikalität der Situationen aus. Darüber hinaus wäre eine gezielte Kontrolle der Umgebung nicht möglich und damit die Reproduzierbarkeit nicht gewährleistet. Versuche in realen Fahrzeugen in abgesperrten Bereichen (Benmimoun u. a., 2007; Klanner u. a., 2008) sind aufwändig in der Umsetzung und beschränken sich meist auf wenige Szenarien. Auch hier ist die Sicherheit aller Beteiligten oberstes Gebot. Letztlich fällt die Wahl auf einen Fahrsimulatorversuch. Da Fahrern im Normalfall keine Fahrfehler unterlaufen, muss die simulierte Umgebung so gestaltet sein, dass trotz korrekten Verhaltens der Probanden eine kritische Verkehrssituation zustande kommt und die Ausgabe einer Warnung auslöst. Dass dies im Experiment nicht immer mit zufriedenstellender Häufigkeit gelingt, zeigen Versuche im Rahmen einer PREVENT Studie (Gradenegger u. a., 2006). Bei der Evaluation des Linksabbiegeassistenten kam eine kritische Situation nur in sechs von 81 Fällen erfolgreich zustande. In den übrigen Situationen reagierten die Probanden nicht wie vom Versuchsleiter intendiert und lieferten somit keinen Beitrag zum Versuchsergebnis. Eine erfolgreiche Kontrolle der Verkehrssituation bei allen Probanden ist schwierig, da das individuelle Fahrverhalten nicht immer durch geeignete Programmlogik des Simulators kompensierbar ist. Ein Ausgleich dieser Ausfallquote durch die Einführung zusätzlicher, ähnlicher Situationen im Simulationskurs begünstigt wiederum einen Lerneffekt bei den Probanden. Die Reaktionszeiten entsprechen dann möglicherweise nicht mehr denen eines überraschten Fahrers. Um den Lerneffekt zu minimieren, sollten den Probanden möglichst unterschiedliche Situationen präsentiert und die Wiederholung identischer Situationen vermieden werden. Dies führt unweigerlich zu einem Versuchsplan mit unabhängigen Stichproben, bei dem eine statistisch relevante Anzahl an verwertbaren Situationen nur über eine Steigerung der Anzahl der Probanden erreichbar ist. Sollen zwei Varianten einer Warnausgabe (hier z.B. *spezifisch* vs. *generisch*) verglichen werden, kann dies bei einem Versuchsplan mit unabhängigen Stichproben nur zwischen zwei Probandengruppen erfolgen. Beispielsweise wird dieselbe Verkehrssituation zwei verschiedenen Probanden mit jeweils einem Anzeigekonzept präsentiert. Die Gewährleistung der Vergleichbarkeit erfordert eine exakte Reproduzierbarkeit der Verkehrssituation. Die Verkehrssituation sollte vom individuellen Fahrverhalten der Probanden unabhängige Ergebnisse liefern (z.B. Reaktionszeiten), da ansonsten große Streuungen einen Nachweis des zu untersuchenden Effekts erschweren.

Um ein Zustandekommen der Situationen zu garantieren und eine optimale Reproduzierbarkeit zu gewährleisten, wurde in beiden Versuchen eine Videoszenario-Technik in Anlehnung an Lange u. a. (2008) verwendet. Hierbei werden den Probanden im Fahrsimulator verschiedene Videosequenzen vorgespielt, die jeweils eine kritische Verkehrssituation zeigen<sup>2</sup>.

## 4.2 Konzeption der Warnsymbole

Im EU-Projekt INTERSAFE wurden unter anderem ein Querverkehrsassistent und ein Linksabbiegeassistent entwickelt und in einer Simulatorstudie evaluiert (Fuerstenberg u. a., 2007). Die Symbole für diese beiden Warnsysteme wurden im Rahmen dieser Arbeit gestaltet (Abbildung 4.2). Die gemeinsame Basis für die Symbole bildet eine perspektivisch dargestellte Kreuzung. Zusätzliche Pfeile zeigen dem Fahrer an, aus welcher Richtung mit einem Fahrzeug an der nächsten Kreuzung zu rechnen ist. Zusätzlich findet eine Aufteilung in eine frühzeitige Vorwarnung und eine Akutwarnung zum spätest möglichen Warnzeitpunkt statt. Die Akutwarnung bedient sich des *Kollisions-Sterns* aus dem ISO Auffahrwarnsymbol. Die Farbgestaltung in Rot und Orange spiegelt die Kritikalität wieder (Edworthy und Adams, 1996). Beim Linksabbiegeassistenten gibt es nur eine Information im Stand und eine Akutwarnung, jedoch keine Vorwarnung (Begründung siehe Abschnitt 2.5.3).

Die Symbole wurden für den hier beschriebenen Versuch in einer reduzierten Darstellung übernommen und um weitere Symbole für eine Auffahrwarnung, eine Fußgängerwarnung, eine Ampelwarnung und eine Stoppschildwarnung ergänzt (siehe Abbildung 4.3). Das Symbol der Auffahrwarnung wurde aus dem BMW Seriensystem übernommen. Das Fußgängersymbol entstammt dem Zeichen 133 der StVO (Deutsches Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 1970). Ein zusätzliches Warnsymbol *Achtung* ohne Angabe einer Gefahrenquelle bildet die generische Warnung (entspricht Zeichen 101 der StVO).

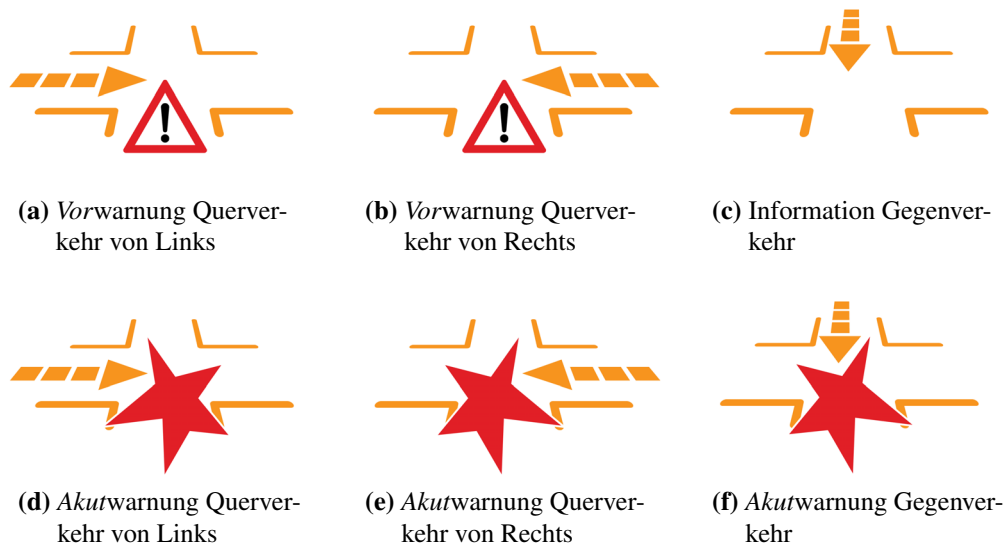
Die sechs ausgewählten Warnsysteme mit ihren jeweiligen Unterfunktionen (z.B. Querverkehr von *links/rechts*) decken einen Großteil der relevanten Kreuzungssituationen ab. Auf die Aufnahme weiterer Systeme in die Untersuchung wurde deshalb verzichtet.

## 4.3 Untersuchungen zum Verständnis von generischen Warnungen

In der ersten von zwei Studien wurde das Verständnis einer Warnung im Kontext der Fahrumgebung untersucht.

---

<sup>2</sup>Die Ergebnisse dieser Studie wurden in Thoma u. a. (2008b) veröffentlicht.



**Abbildung 4.2:** Die im Rahmen dieser Arbeit für das INTERSAFE Projekt konzipierten Warnsymbole (Fuerstenberg u. a., 2007)

### 4.3.1 Versuchsbeschreibung

Alle Versuche wurden in einem statischen Fahrsimulator der BMW Group durchgeführt. Die Szenerie wurde über fünf Grafikkanäle auf Plasmabildschirmen dargestellt (siehe Abbildung 4.4). Damit wurde ein Blickwinkel von ca. 180° erreicht. Die Warnsymbole wurden dem Fahrer in einem Head-up-Display und im Kombi-Instrumentendisplay eingeblendet. Das Head-up-Display war mittels einer Combiner-Scheibe und eines lichtstarken LCD-Monitors im vorderen Teil der Sitzkiste realisiert.

Im Falle einer Gefahrensituation wird eine Warnung ausgegeben und das Video ca. eine Sekunde danach ausgeblendet (siehe Abbildung 4.5). Das rasche Ausblenden der Szene sollte ein nachträgliches Interpretieren der Verkehrssituation verhindern. Die Probanden waren somit zur Analyse der Verkehrsszene auf die Eindrücke angewiesen, die sie bis zum Zeitpunkt der Warnung gewonnen hatten. Die Äußerungen der Probanden wurden in einem festen Zeitfenster nach der Warnung elektronisch aufgezeichnet und später durch den Versuchsleiter mittels einer für diesen Zweck entwickelten Software ausgewertet (siehe Abbildung 4.6).

Die Probanden füllten zunächst einen Fragebogen aus, der grundlegende Daten wie Alter, Geschlecht, jährliche Kilometerfahrleistung und Simulatorerfahrung abfragte (siehe Anhang A.1). Nachdem die Probanden in der Sitzkiste Platz genommen haben, wurden ihnen sinngemäß folgende Informationen mitgeteilt:

*„Sie werden im Folgenden verschiedene Fahrszenen im Stadtbereich sehen, die*



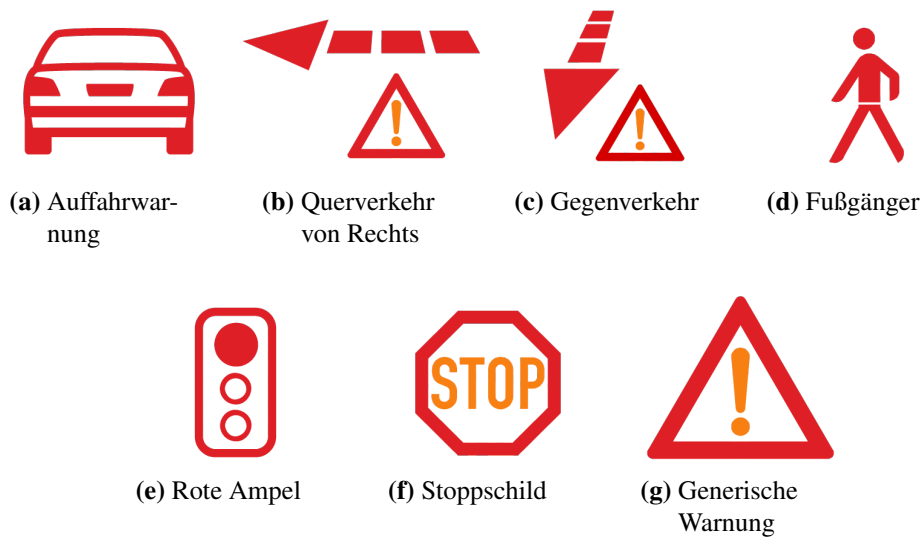


Abbildung 4.3: Warnsymbole für die sechs Einzelsysteme und die generische Warnung

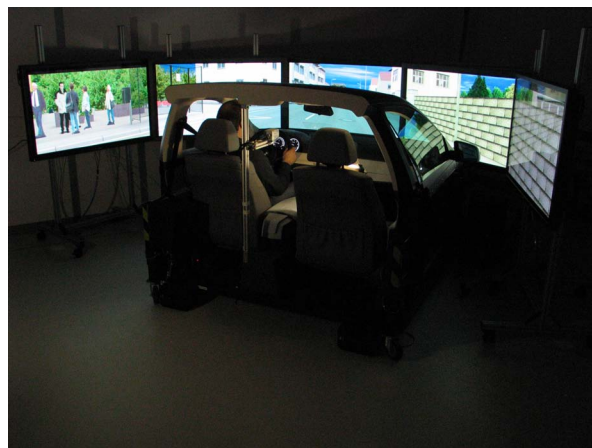


Abbildung 4.4: Fahrsimulatorenaufbau mit fünf Plasmabildschirmen

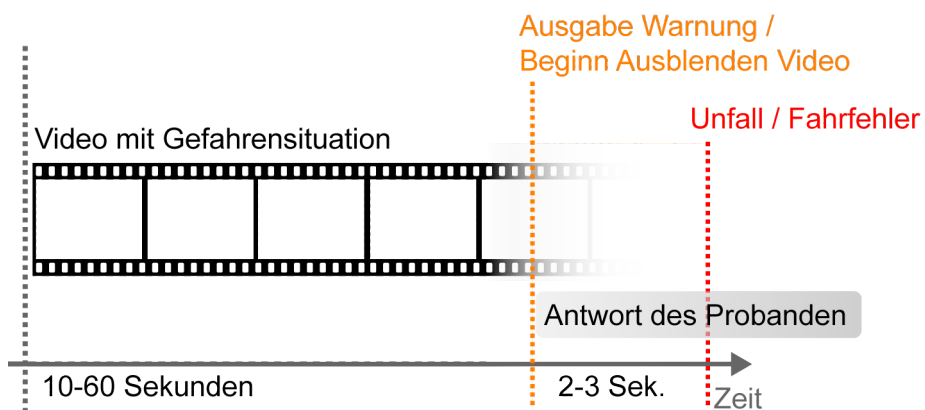
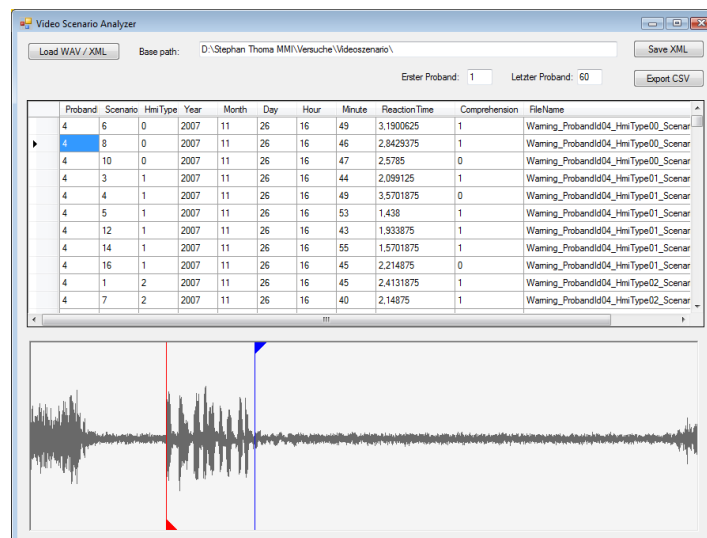


Abbildung 4.5: Zeitlicher Versuchsablauf



**Abbildung 4.6:** Für den Versuch entwickelte Auswertesoftware zur Markierung des Beginns der Äußerung und Klassifizierung der Korrektheit der Antwort

*Sie selbst nicht beeinflussen können. Versetzen Sie sich in die Lage eines Fahrlehrers, der einen Fahrschüler überwachen muss. Es ist wahrscheinlich, dass der Fahrschüler Fahrfehler begeht. Ihre Aufgabe ist es, immer wenn das Video ausgeblendet wird, die Art des Fahrfehlers so schnell und spontan wie möglich zu benennen. Sie werden dabei von einem Warnsystem unterstützt, das Ihnen unter Umständen weitere Informationen zum Grund des Abbruchs übermittelt. Allerdings ist das Warnsystem selbst auch fehlerbehaftet und erkennt beispielsweise bestimmte Situationen nicht. Es ist also unerlässlich, die Fahrscene kontinuierlich zu überwachen.“*

### 4.3.2 Versuchsplan

Für das Experiment wurde ein dreifaktorielles Design gewählt:

**Faktor 1: HMI Typ** Es wurden folgende Warnausgabe-Typen unterschieden:

**Faktorstufe 1: Keine Warnung** Hier erhält der Proband keinerlei Warnung, obwohl diese aufgrund der Verkehrssituation gerechtfertigt wäre (*false negative*). Diese Bedingung dient als Baseline-Messung, um die Reaktion auf die Situationen ohne Warnsystem zu ermitteln.

**Faktorstufe 2: Ausschließlich akustische Warnung** Der Proband erhält eine akustische, aber keine optische Warnung.

**Faktorstufe 3: Akustische und spezifische visuelle Warnung** Im Falle einer kritischen Situation wird eine akustische Warnung (identisch zu Bedingung 2) ausgegeben und durch ein spezifisches Warnsymbol ergänzt (siehe Abbildungen 4.3a bis 4.3f).

**Faktorstufe 4: Akustische und generische visuelle Warnung** Im Falle einer kritischen Situation wird eine akustische Warnung (identisch zu Bedingung 2) ausgegeben und durch das generische Warnsymbol ergänzt (siehe Abbildung 4.3g).

**Faktor 2: Warnsituation** Es ist zu erwarten, dass das Verständnis der Warnung stark von der Art der kritischen Situation abhängt. Deshalb wurden die folgenden Warnsituationen unterschieden (Beispiel siehe Tabelle 4.1):

**Faktorstufe 1: Einfach erkennbar** Der Grund für die Warnung ist zum Zeitpunkt der Warnung einfach erkennbar und es werden – abgesehen von einem Blick durch die Windschutzscheibe des Fahrzeugs – keine weiteren Informationen benötigt.

**Faktorstufe 2: Schwer erkennbar** Der Grund für die Warnung ist zum Zeitpunkt der Warnung schwer erkennbar. Der Fahrer benötigt unter Umständen Zusatzinformation um den Grund der Warnung zu verstehen. Dies kann beispielsweise bei Verdeckungen des bewarnten Objekts notwendig sein.

**Faktorstufe 3: Zweites Ereignis** Es gibt zwei mögliche Gründe für die Warnung, jedoch rechtfertigt nur einer die Ausgabe einer Warnung. Der Fahrer wird von der Art der Warnung möglicherweise in seiner Entscheidung beeinflusst.

**Faktorstufe 4: Falschwarnung** Die Situation rechtfertigt eine Warnung, jedoch wird in der Bedingung *spezifisches Warnsymbol* ein falsches Warnsymbol ausgegeben. Hier soll überprüft werden, ob ein falsches spezifisches Warnsymbol die Einschätzung des Fahrers auch negativ beeinflussen kann. Für die übrigen HMI Typ Bedingungen ist dieser Situationstyp nicht relevant.

**Faktor 3: Warnsystem** Für diese Untersuchung wurden die sechs Warnsysteme *Auffahrwarnung*, *Querverkehr*, *Linksabbiegen/Gegenverkehr*, *Fußgänger*, *rote Ampel* und *Stopp-schild* verwendet.

Der *HMI Typ* wurde als Zwischensubjektfaktor und die Faktoren *Warnsituation* bzw. *Warnsystem* als Intrasubjektfaktoren umgesetzt. Um eine Wiedererkennung der Situationen zu vermeiden wurden die beiden Intrasubjektfaktoren über eine erhöhte Anzahl von Situationen abgebildet. Von den theoretisch möglichen 24 Kombinationen (sechs Warnsysteme mal vier Warnsituationen) wurden 23 implementiert (die Kombination *Zweites Ereignis* und *Fußgängerwarnung* fehlte). Eine vollständige Liste aller Situationen und deren Beschreibung findet sich in Anhang A.2. Zur Vermeidung von Reihenfolgeeffekten wurde die Reihenfolge der Situationen randomisiert permutiert (siehe Abbildung 4.7). Um darüber hinaus keine Gewöhnung an eine bestimmte Art der Rückmeldung bei den Probanden hervorzurufen, wurde der *HMI Typ* ebenfalls zufällig gewählt. Die Randomisierung des *HMI Typs* erfolgte so, dass nach jeweils vier Probanden für jede Situation jeder *HMI Typ* genau einmal präsentiert wurde (siehe Abbildung 4.7).

Die **erste abhängige Variable** war die Korrektheit der Antwort des Probanden. Der Versuchsleiter klassifizierte die aufgezeichneten Antworten der Probanden nach dem Versuch in

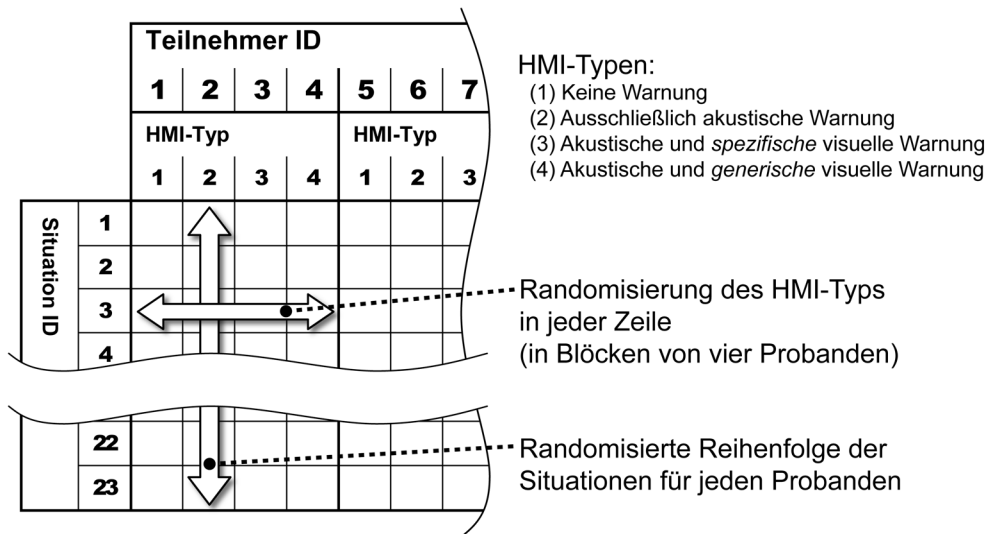
Warnsituation	Situationsbeschreibung
<i>Einfach erkennbar</i>	Der Fahrer übersieht Querverkehr an einer Kreuzung von zwei Landstraßen. Es liegen kaum Sichtverdeckungen vor.
<i>Schwer erkennbar</i>	Der Fahrer missachtet die Vorfahrt des Querverkehrs. Es liegen starke Sichtbehinderungen vor.
<i>Zweites Ereignis</i>	Der Fahrer wartet auf eine passende Lücke im Querverkehr an einer Kreuzung um diese zu überqueren. Beim Beschleunigen übersieht er einen Fußgänger, der im selben Moment auf der gegenüberliegenden Seite die Straße überquert.
<i>Falschwarnung</i>	Der Fahrer missachtet die Vorfahrt an einer Kreuzung. Es wird ein falsches Warnsymbol präsentiert.

**Tabelle 4.1:** Beispiel für Situationsbeschreibungen für die vier Stufen des Faktors *Warnsituation* für das Warnsystem *Querverkehr*

die Kategorien *richtig*, *falsch* und *sonstiges*. Die Kategorie *sonstiges* geht in die Statistik als fehlender Wert ein. Eine Antwort wurde als richtig gewertet, wenn der Proband im festgelegten Zeitfenster von 14 Sekunden ab dem Zeitpunkt der Warnung den korrekten Grund für die Warnung genannt hatte. Falls der Proband eine Antwort gab, die nicht zum Grund der Warnung passte, wurde die Antwort als falsch markiert. Alle übrigen Fälle (z.B. keine oder unverständliche Antwort) ergaben einen fehlenden Wert für die Auswertung. Die Zeitdauer vom Zeitpunkt der Warnung bis zum Beginn der Äußerung des Probanden bildete die **zweite abhängige Variable**. Diese Reaktionszeit wurde vom Versuchsleiter nach dem Experiment manuell ermittelt. Entscheidend war der Beginn der eigentlichen, korrekten Antwort. Hesitationen vor dem Beginn der eigentlichen Antwort wurden übersprungen.

### 4.3.3 Stichprobe

In Abwägung einer handhabbaren Gesamtzahl an Probanden und einer möglichst hohen Zahl an Ereignissen wurde das Experiment mit 60 Probanden durchgeführt. So ergeben sich 15 Ereignisse für jeden der vier HMI-Typen. 15 Probanden waren weiblich, 45 männlich. Das Durchschnittsalter betrug 29,4 Jahre bei einer Standardabweichung von 7,7 Jahren. 31 Teilnehmer hatten keine vorhergehende Fahrsimulatorerfahrung; 13 Probanden hatten bereits an mindestens einem oder an zwei Experimenten in der Vergangenheit teilgenommen; der Rest war simulatorerfahren und hatte bereits drei oder mehr Experimente in der Fahrsimulation abgeschlossen. 33 Probanden gaben an, mehr als 10.000 Kilometer im Jahr mit dem Auto zu fahren. Alle Teilnehmer waren interne, externe oder temporäre Mitarbeiter der BMW Group (26 Studenten der Ingenieurwissenschaften, 14 Mitarbeiter aus dem Bereich Entwicklung, sieben Mitarbeiter aus dem Bereich Finanzen, der Rest aus anderen Bereichen). Die



**Abbildung 4.7:** Versuchsplan und Schema der Randomisierung der Reihenfolge der HMI-Typen und der Situationen

Teilnahme am Experiment wurde nicht gesondert vergütet. Die ungleichmäßige Geschlechtsverteilung spiegelt hauptsächlich die Demographie der Belegschaft im Unternehmensbereich Forschung und Entwicklung wieder. Eine Akquise externer Probanden für dieses Experiment war nicht möglich. Es wurden keine anderweitigen Aus- oder Einschlusskriterien für die Probandenauswahl angewendet.

#### 4.3.4 Ergebnisse

Die Antworten lagen nach dem Experiment in 1380 einzelnen Tondateien vor (60 Teilnehmer und jeweils 23 Video-Szenen) und wurden durch den Versuchsleiter mit Hilfe einer eigens für den Versuch entwickelten Auswertesoftware manuell interpretiert (siehe Abbildung 4.6). 30 Aufnahmen wurden für die weitere Analyse nicht berücksichtigt. Sie enthielten entweder keine Antwort (im vorgegebenen Zeitfenster) oder unverständliche bzw. sinnlose Äußerungen und waren über die gesamte Stichprobe zufällig verteilt (keine Häufung bei einzelnen Probanden).

#### Korrektheit der Antwort

Tabelle 4.2 zeigt die Häufigkeiten korrekter Antworten für die sechs Warnsysteme unter den vier verschiedenen HMI-Typen. Die Tabelle beschränkt sich aus Gründen der Übersichtlichkeit auf die Warnsituation *schwer erkennbar*. Es sind maximal 15 richtige Antworten in einer Zelle möglich (siehe Beschreibung der Stichprobe in Abschnitt 4.3.3). Es fällt auf, dass die Probanden bei Szenen, die (Beinahe-)Kollisionen mit anderen Fahrzeugen zeigen, keine







Schwierigkeiten hatten, den Grund für die Warnung zu nennen. Dies trifft auf die Warnsysteme *Auffahrwarnung*, *Querverkehr* und *Gegenverkehr* zu. Auch das Ausbleiben einer Warnung unter der Bedingung *keine Warnung* änderte daran nichts. Dies lässt sich auf zwei Gründe zurückführen:

- Es liegt in der Natur der Sache, dass sich zwei Fahrzeuge im Vorfeld einer Kollision aufeinander zubewegen. Deshalb ist es nahezu unmöglich, eine für den Fahrer schwer erkennbare Situation zu kreieren. Selbst die starken Sichtverdeckungen bei den Querverkehrssituationen waren dafür nicht ausreichend.
- Die Probanden konnten sich voll auf die Szenerie konzentrieren, da keine anderen Tätigkeiten zu verrichten waren.







Der erste Grund ist prinzipbedingt und lässt sich nicht beeinflussen. Um den zweiten Sachverhalt zu adressieren, wurde im zweiten Experiment eine visuelle Nebenaufgabe verwendet, um eine künstliche Ablenkung zu schaffen.

Die hohe Anzahl richtiger Antworten ist im Hinblick auf die Fragestellung, ob ein spezielles Warnsymbol vom Fahrer in die Situationsinterpretation mit einbezogen wird, ungünstig. Denn so bleibt kein Spielraum für eine Verbesserung des Situationsverständnisses bzw. das verwendete Maß, die Anzahl der richtigen Antworten, ist zur Analyse ungeeignet. Dementsprechend waren in den Situationen *Auffahrwarnung*, *Querverkehr* und *Gegenverkehr* keine Effekte nachweisbar.

Tabelle 4.3 auf der nächsten Seite zeigt die p-Werte des exakten Fischertests (Bortz, 2005; Bühl und Zöfel, 2004) aller 23 Situationen für den Vergleich zwischen den Bedingungen *spezifisches Warnsymbol* und *generisches Warnsymbol*. Offenbar hat die Art der visuellen Warnung in den einfach zu erkennenden Situationen keinen Einfluss. In den schwer erkennbaren Situationen hingegen haben die Probanden im Falle der Fußgängerwarnung und der Ampelwarnung signifikant mehr richtige Antworten gegeben, wenn ein spezifisches Warnsymbol präsentiert wurde (siehe auch die rechten beiden Spalten in der Tabelle 4.2 auf der nächsten Seite). Es ist folglich anzunehmen, dass die Probanden, denen ein spezifisches Warnsymbol gezeigt wurde, dieses in die Interpretation der Situation mit einbezogen. In der Szene der Bedingungs-Kombination *Ampelwarnung/Falschwarnung* ist der Proband mit einer „Beinaheüberfahrt“ einer roten Ampel konfrontiert. Ihm wird jedoch unter der Bedingung *spezifisches Warnsymbol* ein falsches Warnsymbol angezeigt (hier Fußgängerwarnung). Aus Tabelle 4.3 geht hervor, dass in dieser Situation das falsche Warnsymbol die Entscheidung der Probanden, welchen Grund die Warnung hat, negativ beeinflusst. Hier wurden signifikant mehr falsche Antworten gegeben, wenn ein falsches spezifisches Warnsymbol gezeigt wurde. Dies lässt den Schluss zu, dass ein spezifisches Warnsymbol in manchen Situationen positiven Einfluss, im Falle eines falschen Symbols jedoch auch negativen Einfluss auf das Situationsverständnis haben kann. In allen anderen Situationen konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden HMI-Typen *spezifisches Warnsymbol* und *generisches Warnsymbol* nachgewiesen werden.

		HMI-Typ			
		Keine Warnung	Akustische Warnung	Akustische und generische visuelle Warnung	Akustische und spezifische visuelle Warnung
Warnsystem		15	15	15	15
		14	13	15	15
		14	12	13	10
		2	1	2	9
		8	5	6	13
		5	2	2	7

**Tabelle 4.2:** Anzahl der Probanden, die richtig geantwortet haben für die Warnsituation *Schwer erkennbar*

		Warnsituation			
		Einfach erkennbar	Schwer erkennbar	Falsch-warnung	Zweites Ereignis
Warnsystem		1.000	1.000	1.000	1.000
		1.000	.483	.598	.139
		1.000	.390	1.000	.102
		1.000	.021*	1.000	Szenario nicht umgesetzt
		1.000	.021*	.041**	.025*
		1.000	.109	.700	.272

\* Signifikant mehr richtige Antworten unter der Bedingung „Spezifisches Warnsymbol“

\*\* Signifikant mehr richtige Antworten unter der Bedingung „Generisches Warnsymbol“

**Tabelle 4.3:** p-Werte für den Vergleich der Anzahl der richtigen Antworten unter den Bedingungen *Generisches Warnsymbol* und *Spezifisches Warnsymbol*

### Antwortreaktionszeit

Der Vergleich der Antwortreaktionszeit<sup>3</sup>, für die HMI-Typen *spezifisches Symbol* und *generisches Symbol* erfolgte mittels Kolmogorov-Smirnov Tests, da die zugrundeliegenden Daten nicht normalverteilt waren. Von den 23 Vergleichstests fiel lediglich einer signifikant aus. Da bei einem 5% Signifikanzniveau 5 von 100 Signifikanztests zufällig signifikant werden, muss dieses Ergebnis als Zufallsprodukt gewertet werden. Die Streuungen der Reaktionszeiten waren zu groß. Die Antwortreaktionszeit hängt offenbar zu stark von individuellen Faktoren ab und ist damit kein geeignetes Maß, um daraus Schlüsse zu ziehen.

## 4.4 Untersuchungen zur Reaktion auf generische Warnungen

In der zweiten Simulatorstudie sollte der Einfluss der Gestaltung des visuellen Warnsymbols auf die Reaktionszeit in kritischen Situationen untersucht werden. Das Konzept der Präsentation einzelner Videosequenzen wurde beibehalten und um eine Interaktionsmöglichkeit zwischen Proband und Simulation über das Bremspedal erweitert. Statt den Grund der Warnung zu artikulieren waren die Probanden in diesem Experiment dazu aufgefordert, das Video durch eine Betätigung des Bremspedals immer dann zu unterbrechen, wenn eine kritische Situation vorliegt und ein Bremsmanöver im realen Verkehrsgeschehen angebracht wäre. So war es möglich, die Vorteile der Videoszenariotechnik mit einer realen Reaktionszeitmessung zu verbinden.

### 4.4.1 Versuchsbeschreibung

Der Aufbau des Simulators entsprach dem des ersten Experiments. Die Simulation wurde so erweitert, dass das Video bei einer Betätigung des Bremspedals anhält. Für den Bremsdruck wurde ein Grenzwert gewählt, der in etwa einer 70% Verzögerung entspricht. Das Video wurde im Gegensatz zum ersten Experiment nicht ausgeblendet, sondern im Moment der Bremspedalbetätigung eingefroren. Erfolgte eine grundlose Betätigung durch den Probanden, so konnte das Video ohne störende Blendeffekte fortgesetzt werden. Darüber hinaus ist bei der Reaktionszeitmessung unerheblich, ob der Proband die Szene nach Abbruch weiter analysieren kann oder nicht. Blieb eine Reaktion des Probanden aus, so lief das Video bis zum Zusammenstoß der Fahrzeuge bzw. bis zum Verstoß gegen die Verkehrsregelung (z.B. Überfahren einer roten Ampel) und hielt dann an. Die Auswertung der Reaktionszeiten erfolgte automatisch durch das Simulationssystem. Die Reaktionszeit war definiert als die Zeitdauer zwischen dem Beginn der Ausgabe der Warnung und dem Beginn der Bremsreaktion. Die Probanden wurden angehalten, den Fuß immer auf dem Gaspedal abzulegen und nur wenn

---

<sup>3</sup>Die Zeit die vergeht, bis der Proband beginnt, den Grund der Warnung zu formulieren



nötig auf die Bremse zu wechseln. Der Versuchsleiter kontrollierte die Einhaltung dieser Anweisung über eine Kamera im Fußraum der Sitzkiste.

Um der geringen Fehlerrate im ersten Experiment Rechnung zu tragen, bearbeiteten die Probanden im zweiten Experiment eine Nebenaufgabe (siehe Abbildung 4.8). Diese soll die Ablenkung simulieren, die durch die Bedienung von Informationssystemen, wie Entertainment- oder Kommunikationsfunktionen, im Fahrzeug entsteht. Zu diesem Zweck wurde der Critical Tracking Task eingesetzt (Jex, 1988). Es handelt sich hierbei um eine visuell/motorische Aufgabe, bei der eine Störgröße durch Eingaben in einer Tastatur durch den Probanden ausgeregelt werden muss. Abbildung 4.9 zeigt einen Bildschirmabdruck der Implementierung von Dynamic Research. Der schwarze Balken wird zufällig von der Mitte nach oben und unten verschoben. Der Proband kompensiert diese Störung durch geeignete Betätigung der Pfeiltasten auf einer Tastatur. Ziel ist es, den Balken zu jedem Zeitpunkt möglichst nah an der Mittenposition zu halten. Die Stärke der zufälligen Störgröße ist abhängig vom eingestellten Lambda-Wert. Die Präsentation des Critical Tracking Task erfolgte im zentralen Informationsdisplay der Sitzkiste und die Bedienung über eine Pfeiltastatur, die an der Position des i-Drive-Controllers montiert war.

Da in diesem Experiment die Reaktionszeiten zweier unabhängiger Stichproben verglichen wurden, war die Erhebung einer Baseline-Reaktionszeitmessung notwendig. Dazu sahen die Probanden für mehrere Minuten eine Fahrt auf einer Autobahn und erhielten in zufälligen Zeitabständen Warnungen. Es galt diese Warnungen so schnell wie möglich durch eine Betätigung des Bremspedals zu bestätigen. Für diese Reaktionszeitmessung wurde bewusst keine Szene im Stadtbereich gewählt, um die Probanden zunächst unabhängig von der späteren Aufgabe mit dem Versuchsaufbau vertraut zu machen. Für die reine Reaktionszeiterhebung war der Inhalt der Szene ohnehin unerheblich.

Während des ersten Experiments hatten einige Probanden in den ersten Szenen Schwierigkeiten, den Anweisungen des Versuchsleiters entsprechend zu handeln. Deshalb sah der

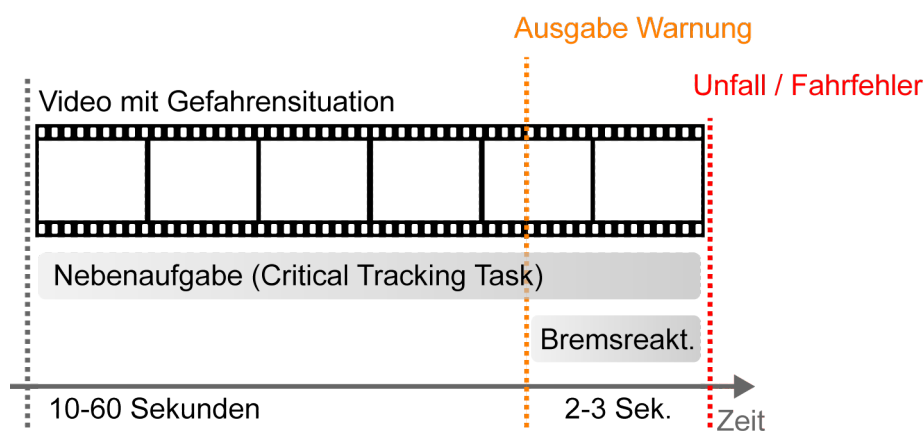


Abbildung 4.8: Zeitlicher Versuchsablauf

Ablauf im zweiten Experiment zwei zusätzliche Übungssituationen vor. Die Übungssituationen flossen nicht in die Auswertung ein.

Die Anweisungen an die Probanden waren leicht abgewandelt im Vergleich zum ersten Experiment:

*„Sie werden im Folgenden verschiedene Fahrscenen im Stadtbereich sehen. Versetzen Sie sich in die Lage eines Fahrlehrers, der einen Fahrschüler überwachen muss. Es ist wahrscheinlich, dass der Fahrschüler Fahrfehler begeht. Ihre Aufgabe ist es, diese Fahrfehler durch Betätigung des Bremspedals zu verhindern. Das Video wird dann an dieser Stelle angehalten. Sie werden dabei von einem Warnsystem unterstützt. Allerdings ist das Warnsystem selbst auch fehlerbehaftet und erkennt beispielsweise bestimmte Situationen nicht. Es ist also unerlässlich, die Fahrscene kontinuierlich zu überwachen. Sie sollten in jedem Fall vermeiden, ohne Grund einzugreifen. Zusätzlich werden Sie während des Experiments eine Nebenaufgabe bearbeiten [...]“*

#### 4.4.2 Versuchsplan

Für das zweite Experiment wurde ein dreifaktorielles Design gewählt:

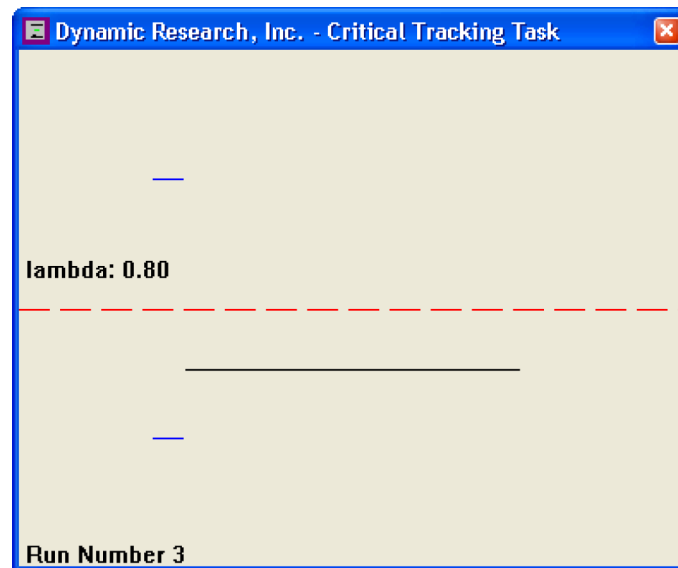
**Faktor 1: HMI Typ** Die Anzahl der HMI-Typen wurde für dieses Experiment reduziert, um auf die wesentliche Fragestellung zu fokussieren und damit die Anzahl der Probanden zu reduzieren:

**Faktorstufe 1: Akustische und spezifische visuelle Warnung** Im Falle einer kritischen Situation wird eine akustische Warnung ausgegeben und durch ein spezifisches Warnsymbol ergänzt (siehe Abbildungen 4.3a bis 4.3f).

**Faktorstufe 2: Akustische und generische visuelle Warnung** Im Falle einer kritischen Situation wird eine akustische Warnung ausgegeben und durch das generische Warnsymbol ergänzt (siehe Abbildung 4.3g).

**Faktor 2: Warnsituation** Da die leicht erkennbaren Situationen im ersten Experiment keine signifikanten Unterschiede in der Anzahl der richtigen Antworten zeigten, wurde auf diese Faktorstufe verzichtet. Die Falschwarnung, also das Präsentieren eines falschen spezifischen Symbols, wurde ebenfalls nicht übernommen. Stattdessen fand eine Erweiterung um eine Fehlwarnung und eine Nicht-Warnung statt.

**Faktorstufe 1: Schwer erkennbar** Der Grund für die Warnung ist zum Zeitpunkt der Warnung schwer erkennbar. Der Fahrer benötigt unter Umständen Zusatzinformation um den Grund der Warnung zu verstehen. Dies kann beispielsweise bei Verdeckungen des bewarnten Objekts notwendig sein.



**Abbildung 4.9:** Im Versuch eingesetzter Critical Tracking Task zur Simulation einer Ablenkung im Fahrzeug. Rote Linie: Mittelposition, blaue Linien: Zulässige Extrempositionen, schwarze Linie: aktuelle Position

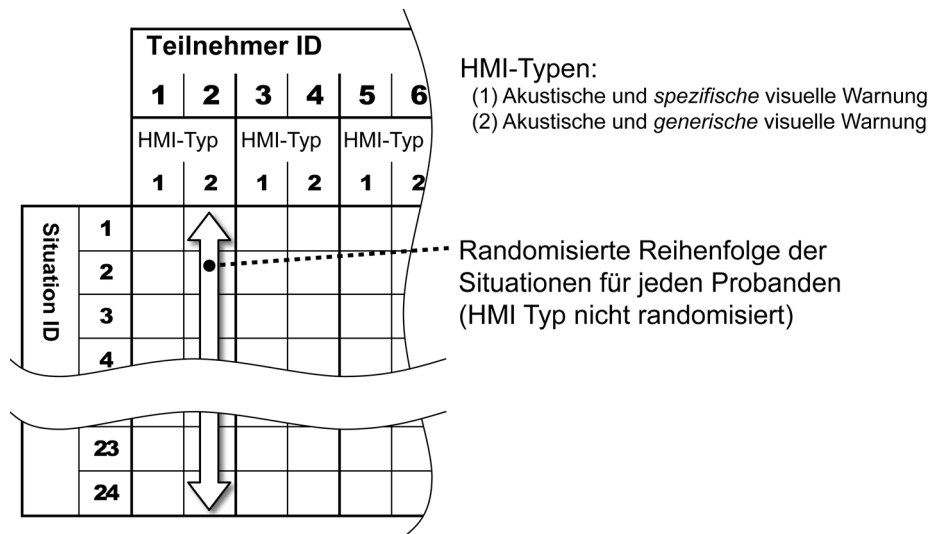
**Faktorstufe 2: Zweites Ereignis** Es gibt zwei mögliche Gründe für die Warnung, jedoch rechtfertigt nur einer die Ausgabe einer Warnung. Der Fahrer wird von der Art der Warnung möglicherweise in seiner Entscheidung beeinflusst.

**Faktorstufe 3: Fehlwarnung (*false positive*)** Es ist keine Gefahr in der Videoszene zu erkennen, dennoch wird eine Warnung ausgegeben.

**Faktorstufe 4: Keine Warnung (*false negative*)** Es liegt eine Gefahrensituation in der Videoszene vor, die Ausgabe einer Warnung unterbleibt jedoch.

**Faktor 3: Warnsystem** Für diese Untersuchung wurden wiederum die sechs Warnsysteme *Auffahrwarnung*, *Querverkehr*, *Linksabbiegen/Gegenverkehr*, *Fußgänger*, *rote Ampel* und *Stoppsschild* verwendet.

Der *HMI Typ* wurde auch im zweiten Experiment als Zwischensubjektfaktor und die Faktoren *Warnsituation* bzw. *Warnsystem* als Intrasubjektfaktoren umgesetzt. Es wurden alle 24 möglichen Kombinationen (sechs Warnsysteme mal vier Warnsituationen) implementiert. Eine vollständige Liste aller Situationen und deren Beschreibung findet sich an Anhang A.3. Zur Vermeidung von Reihenfolgeeffekten wurde die Reihenfolge der Situationen randomisiert permutiert. Auf eine Permutation des HMI-Typs wurde in diesem Experiment verzichtet (siehe Abbildung 4.7). Ein Proband erhielt also entweder immer ein spezifisches Warnsymbol oder immer ein generisches Warnsymbol. Die Videosequenzen wurden größtenteils aus dem ersten Experiment übernommen. Lediglich leichte Modifikationen im zeitlichen Ablauf und einige zusätzliche Sequenzen waren nötig.



**Abbildung 4.10:** Versuchsplan und Schema der Randomisierung der Reihenfolge der Situationen

#### 4.4.3 Stichprobe

Da sich die schwache Zellenbesetzung im ersten Experiment bei der Auswertung nachteilig auswirkte, sah der Versuchsplan für das zweite Experiment 20 Probanden pro HMI-Typ vor. Dementsprechend wurde das Experiment mit 40 Probanden durchgeführt, entsprechend der zwei HMI-Typen. Drei Probanden waren weiblich, 37 männlich. Das Durchschnittsalter betrug 29,5 Jahre bei einer Standardabweichung von 7,6 Jahren. 28 Probanden hatten keinerlei vorhergehende Simulatorerfahrung, acht Probanden hatten bereits an mindestens einem oder an zwei Experimenten in der Vergangenheit teilgenommen; der Rest war simulatorerfahren und hatte bereits drei oder mehr Experimente in der Fahrsimulation abgeschlossen. 30 Probanden gaben an, mehr als 10.000 Kilometer im Jahr mit dem Auto zu fahren. Es wurden nur interne und externe BMW Mitarbeiter eingeladen. Die nahezu unveränderte Übernahme der Szenen aus dem ersten Experiment erforderte den Ausschluss von Probanden, die bereits am ersten Experiment teilgenommen hatten. Darüber hinaus wurden keine weiteren Aus- oder Einschlusskriterien für die Probandenauswahl angewendet.

#### 4.4.4 Ergebnisse

Die Simulationsprotokolle wurden nach dem Versuch mit einem dafür entwickelten Softwareprogramm automatisiert ausgewertet und die Reaktionszeiten ermittelt. Die Baselinereaktionszeitmessung zeigte keinen generellen Unterschied zwischen den beiden Probandengruppen (HMI-Typ 1 vs. HMI-Typ 2). Die Reaktionszeiten auf Fehlwarnungen (*false positives*) wurden nicht in die Auswertung einbezogen, da nur vereinzelt auf diese reagiert wurde. Die

übrigen durchschnittlichen Reaktionszeiten sind in Tabelle 4.4 zusammengefasst. Ein Vergleich zwischen zwei unterschiedlichen Szenen ist nicht möglich (und war auch nicht vorgesehen), da diese aufgrund ihrer Gestaltung unterschiedliche Reaktionszeiten liefern. Vergleiche beschränken sich damit auf den Zwischensubjektfaktor HMI-Typ bei ein und derselben Videoszene. In Tabelle 4.4 sind dies die jeweils nebeneinander liegenden Zellen in den Spalten *Schwer erkennbar* und *2. Handlung*.







Unter der Bedingungskombination *Ampellschwer erkennbar* wies ein Kolmogorov-Smirnov Test signifikant schnellere Reaktionszeiten ( $p=0,037$ ) bei der Präsentation eines spezifischen Warnsymbols nach. Der nicht-parametrische Test war notwendig, da die Reaktionszeiten unter dieser Bedingung nicht normalverteilt waren. In dieser Szene war die Ampel bis etwa eine Sekunde, nachdem die Warnung ausgegeben wurde, von einem LKW verdeckt. Offenbar erkannten die Probanden mit Hilfe des spezifischen Ampelwarnsymbols die Situation schneller als jene, die nur ein allgemeines Achtung-Zeichen präsentiert bekamen.

In allen anderen Szenen führte das spezifische Warnsymbol jedoch zu keinem signifikanten Reaktionszeitvorteil. Unter der Bedingungskombination *Querverkehr/schwer erkennbar* ließ sich durch einen t-Test gar eine signifikant schnellere Reaktion bei der Präsentation eines generischen Warnsymbols nachweisen ( $p=0,026$ , Reaktionszeiten waren hier normalverteilt).

## 4.5 Fazit & Diskussion

Der erste Versuch zur Erhebung des Situationsverständnisses zeigt im Falle der Ampel- und Fußgängerwarnung einen signifikanten positiven Einfluss des spezifischen Warnsymbols. Eine mögliche Erklärung für dieses Ergebnis ist, dass die zwei spezifischen Symbole für diese beiden Warnsysteme sehr einfach gestaltet sind und sich deren Bedeutung aufgrund der bekannten Formen intuitiv erschließt. Zusätzlich kommt hinzu, dass der signifikante Einfluss dort nachgewiesen werden kann, wo ein Blick durch die Windschutzscheibe zum Zeitpunkt der Warnung keinen Rückschluss auf den Grund der Warnung erlaubt. Dies ist ein Hinweis darauf, dass Warnsysteme, die trotz Sichtverdeckungen vor gefährlichen Situationen warnen können, von der Verwendung spezifischer Warnsymbole profitieren. Vor allem bei Systemen, deren Sensorik auf drahtloser Kommunikation beruht, ließe sich so ein Reaktionszeitvorteil erreichen. Beispiele hierfür sind das Amulett-Projekt (siehe Abschnitt 2.5.5 auf Seite 30) oder die drahtlose Kommunikation mit Ampelanlagen. Für die Ampelwarnung lässt sich dieser Reaktionszeitvorteil im zweiten Versuch signifikant nachweisen.

Gleichzeitig zeigt das erste Experiment jedoch auch die Tatsache, dass der Fahrer durch ein falsches spezifisches Symbol verwirrt werden kann und daraus möglicherweise eine Verschlechterung der Reaktionszeit resultiert. Der Reaktionszeitnachteil in der Querverkehrssituation im zweiten Experiment lässt sich möglicherweise ähnlich begründen. In einer komplexen Verkehrssituation werden die Probanden, die ein generisches Warnsymbol erhalten, weniger durch die Interpretation der Warnung aufgehalten und können sich besser auf das Verkehrsgeschehen konzentrieren.

		Warnsituation				
		Keine Warnung (false neg.)	Schwer erkennbar		2. Handlung	
			Gen. Symbol	Spez. Symbol	Gen. Symbol	Spez. Symbol
Warnsystem		0.75 (0.4)	1.5 (0.4)	1.4 (0.4)	1.0 (0.3)	1.1 (0.3)
		1.3 (0.3)	0.9 (0.3)**	1.2 (0.5)	1.4 (0.2)	1.4 (0.3)
		1.4 (0.5)	1.9 (0.3)	2.1 (0.3)	1.5 (0.7)	1.9 (0.7)
		1.77 (0.8)	0.9 (0.4)	0.7 (0.3)	1.5 (0.4)	1.4 (0.5)
		1.6 (0.8)	1.7 (0.5)	1.3 (0.5)*	1.1 (0.4)	1.0 (0.4)
		1.81 (0.3)	(nicht genug Messungen)		1.4 (0.3)	1.5 (0.3)

\* Signifikant kürzere Reaktionszeiten unter der Bedingung *spezifisches* Warnsymbol

\*\* Signifikant kürzere Reaktionszeiten unter der Bedingung *generisches* Warnsymbol

**Tabelle 4.4:** Durchschnitt und Standardabweichung der Reaktionszeiten in Sekunden

Neben diesen einzelnen signifikanten Effekten decken die beiden Experimente keine Unterschiede zwischen den beiden visuellen Warnstrategien auf. Es ergeben sich zwei mögliche Interpretationen:

1. Es gibt nur in ganz bestimmten Verkehrssituationen einen Einfluss des verwendeten Warnsymbols
2. Der Versuchsaufbau und das Versuchsdesign sind nicht dazu geeignet, die Effekte nachzuweisen

Die Argumentation, dass das Vorhandensein von Sichtverdeckungen Einfluss auf die Verarbeitung des Warnsymbols haben kann, stützt die erste These. Möglicherweise existieren weitere Charakteristika von Verkehrssituationen, die die eine oder andere Variante begünstigen.

Einige Gründe sprechen jedoch auch dafür, dass sich das gewählte Versuchssetup negativ auf das Resultat ausgewirkt hat. Das heißt, dass in der Realität weitere Effekte vorhanden sind, diese aber nicht signifikant nachgewiesen werden können. Im ersten Experiment, der Erhebung des Situationsverständnisses durch Beurteilung der Korrektheit von Probanden-Antworten, findet sich selbst in den Situationen ohne Warnung eine äußerst hohe Anzahl richtiger Antworten (siehe Tabelle 4.3). Obwohl die Verkehrssituationen so komplex wie technisch möglich gestaltet sind, hatten nur wenige Probanden Schwierigkeiten, dem Verkehrsgeschehen zu folgen. Diesem Umstand wird im zweiten Versuch durch die Einführung einer visuellen Nebenaufgabe Rechnung getragen. Doch auch hier sind die Reaktionszeiten in

den Situationen ohne Warnung nicht wesentlich höher als in den übrigen Situationen<sup>4</sup> (siehe Tabelle 4.4). Offenbar priorisieren die Probanden die Nebenaufgabe – trotz der Anweisung, diese ständig zu bearbeiten – so, dass daraus keine Beeinträchtigung bei der Wahrnehmung des Verkehrsgeschehens resultiert. Die Ablenkung der Probanden zeitlich gezielter vorzunehmen, also auf die Verkehrssituationen abzustimmen, ist eine mögliche Vorgehensweise für weitere Versuche. Die Problematik einer fehlenden Ablenkung ist kein inhärentes Problem der Videoszenario-Technik. Auch wenn die Probanden selbst durch den Simulationskurs fahren müssen, sind Maßnahmen zur Erzeugung einer Ablenkung vom Verkehrsgeschehen notwendig.

---

<sup>4</sup>Ein Vergleich über einen Signifikanztest ist hier nicht möglich, da die Reaktionszeiten über unterschiedliche Verkehrsszenarien erhoben wurden.





# NUTZUNG DES RÄUMLICHEN HÖRENS FÜR AKUSTISCHE WARNUNGEN

---

Die *Multiple-Resource-Theory* (Wickens, 1980; Wickens und Hollands, 1992) legt nahe, dass die Aufnahme von mehreren Reizen effektiver möglich ist, wenn diese auf unterschiedlichen Modalitäten (insbesondere akustisch und visuell) präsentiert werden. Neuere Untersuchungen zeigen, dass die Informationsaufnahme über die verschiedenen Sinnesmodalitäten nicht völlig unabhängig abläuft, sondern bezüglich der räumlich gerichteten Aufmerksamkeit Verbindungen zwischen den Modalitäten existieren (*cross modal links in spatial attention*, Driver und Spence, 1998). Beispielsweise lässt sich durch die Präsentation eines akustischen Hinweises in einer bestimmten räumlichen Position die Aufnahme von visueller Information aus genau der gleichen Richtung beschleunigen. Ho und Spence (2005) versuchen dieses Prinzip auf die gezielte Lenkung der visuellen Aufmerksamkeit des Fahrers anzuwenden. Dabei stellen sie in einem Experiment verkürzte Reaktionszeiten auf kritische Ereignisse im Fahrkontext fest, wenn kurz vor dem Auftreten des Ereignisses ein akustischer Hinweis aus der Richtung des Ereignisses erfolgt. Ho und Spence (2005) beschränken sich dabei auf die Richtungen vorne und hinten. Tönnis und Klinker (2006) weisen in einem Fahrsimulatorexperiment auch Reaktionsvorteile für unterschiedliche Richtungen im Umfeld des Fahrers nach. Allerdings beschränkt sich die Studie auf die Präsentation abstrakter Reize, ohne eine entsprechende Fahrsituation bzw. kritische Verkehrssituation als Kontext.

Die Lenkung der Aufmerksamkeit durch Warntöne, deren Ursprungsort bzw. Richtung der Fahrer mit einer Gefahrensituation assoziieren kann, scheint ein vielversprechender Ansatz zu sein. Deshalb wird in einem Fahrsimulationsexperiment der Nutzen von gerichteten Warnungen in Gefahrensituationen untersucht<sup>1</sup>. Dabei werden Gefahrensituationen im Stadtbereich provoziert und die Reaktionen der Probanden analysiert. Den Schwerpunkt bilden unfallträchtige Kreuzungssituationen wie das Abbiegen und Queren und die dabei auftretenden Konflikte mit anderen Fahrzeugen und Fußgängern.

---

<sup>1</sup>Im Rahmen einer Diplomarbeit (Nicko, 2009)

## 5.1 Abschätzung des Effekts einer gerichteten Warnung im Laborexperiment

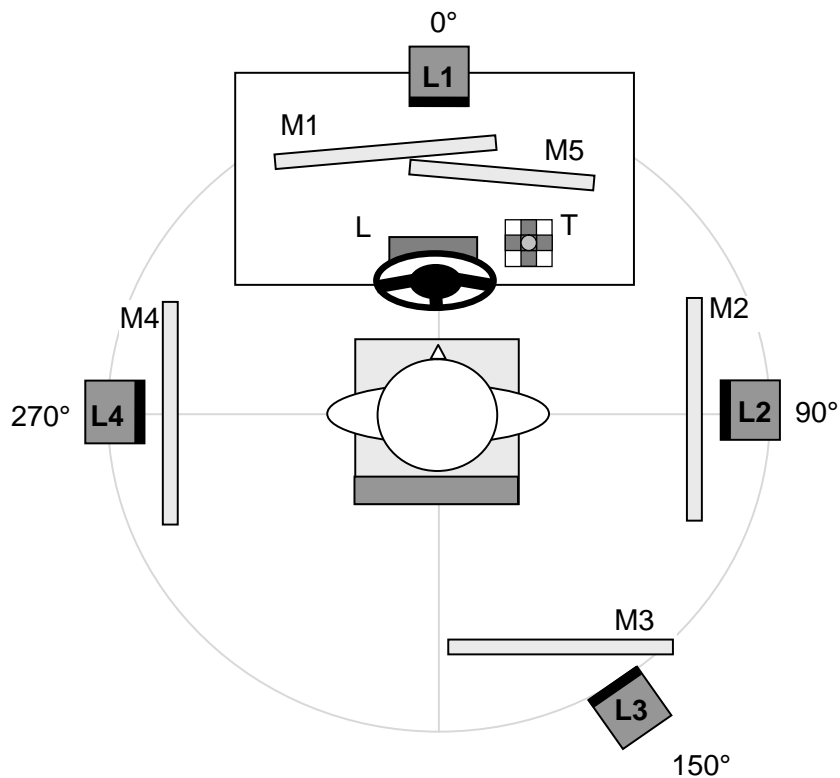
Zunächst soll geklärt werden, ob ein (positiver) Effekt durch eine räumlich gerichtete Warnung existiert und – gesetzt dem Fall – dessen Größe in Form einer oberen Schranke abgeschätzt werden. Hierzu wurde ein Experiment in einer Laborumgebung durchgeführt, das in seinem Aufbau die Idealverhältnisse widerspiegelt und präzise auf die Fragestellung zugeschnitten ist. Damit ist die interne Validität dieser Studie hoch, da die Störgrößen optimal kontrollierbar sind. Die externe Validität ist hingegen niedriger, da die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Realität – also reale Verkehrssituationen – schwerer möglich ist. Allerdings lässt sich mit Hilfe des Laborexperiments mit geringerem Aufwand eine gute Aussage über den maximal möglichen Effekt erzielen. Sind keine oder nur sehr geringe Einflüsse der gerichteten Warnung messbar, können weitere, wesentlich aufwändigere, Simulatorstudien entfallen.

### 5.1.1 Versuchsbeschreibung

Im durchgeführten Wahl-Reaktions-Experiment sind die Probanden von vier Lautsprechern und vier zugeordneten Monitoren umgeben (siehe Abbildungen 5.1 und 5.2). Die Winkelpositionen der Monitore entsprechen den Richtungen im Straßenverkehr, aus denen ein Fahrer mit Gefahren rechnen muss. In  $0^\circ$ -Richtung treten beispielsweise Auffahrwarnungen auf, die Richtungen links und rechts sind relevant für Spurverlassen und im Bereich hinten rechts sind Spurwechselwarnungen oder Totwinkelwarnungen (beim Abbiegen) zu erwarten. Eine direkte  $180^\circ$ -Position für den hinteren Monitor wurde auch aufgrund des als *front-back-confusion* bekannten Problems vermieden (Ho und Spence, 2005).

Auf den Monitoren wird dem Probanden ein Zielreiz oder einer von verschiedenen Distraktoren präsentiert (Abbildung 5.3 auf Seite 82 sowie Abbildung B.2 im Anhang). Erkennt der Proband einen Reiz auf einem der Monitore, so muss er zunächst entscheiden, ob es sich um den Zielreiz handelt und wenn ja, die Richtung des Reizes über eine Pfeiltastatur bestätigen (vorne, links, rechts oder hinten). Das Hintergrundmuster der Monitore wurde so gewählt, dass eine Detektion des visuellen Reizes ohne eine direkte Betrachtung des Monitors kaum möglich ist. Ziel- und Distraktorreize sind sich ähnlich, um die Identifikation des Zielreizes zu erschweren. Während dem Probanden in unregelmäßigen Zeitabständen und aus zufälligen Richtungen Reize präsentiert werden, bearbeitet dieser den Lane-Change-Task (Mattes, 2003). Der Lane-Change-Task ist eine vereinfachte, simulierte, standardisierte Fahraufgabe, die mittels einer Pedalerie und eines Spiele-Lenkrads bedient wird.

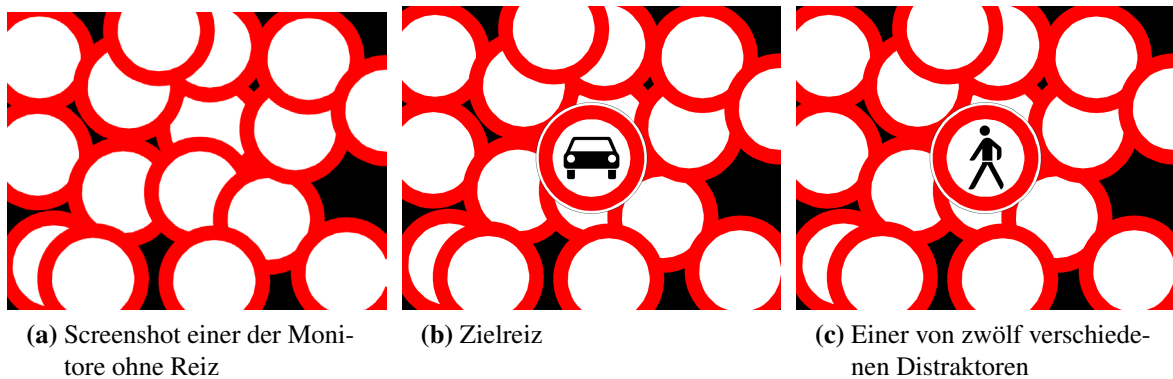
In zwei von drei Versuchsbedingungen wird dem Probanden zusätzlich zum visuellen Reiz ein akustischer Reiz präsentiert. Zur besseren Lokalisierbarkeit kam ein breitbandiger Warn-



**Abbildung 5.1:** Laborexperiment mit vier Lautsprechern (L1-L4), den dazugehörigen Monitoren (M1-M4), Monitor für den Lane-Change-Task (M5), Lenkrad (L) und Nummern-Tastatur zur Auswahl der Richtung (T)



**Abbildung 5.2:** Laborexperiment mit vier Lautsprechern (L1-4), den dazugehörigen Monitoren (M1-4), Rückspiegel (R), Monitor für Lane-Change-Task (M5), Lenkrad zur Steuerung des Lane-Change-Task (L) und Nummern-Tastatur zur Auswahl der Richtung (T)



**Abbildung 5.3:** Ziel- und Distraktorreize für Laborexperiment

ton zum Einsatz, der auch von Ho und Spence (2005) verwendet wurde. Ein Sonogramm des Warntons findet sich im Anhang (Abbildung B.1). Die Dauer des Tons beträgt 600ms, der Schallpegel wurde auf 74 dB(A) eingestellt. Die Ausgabe des Tons startete 500ms vor der Präsentation des visuellen Reizes.

### 5.1.2 Versuchsplan und Versuchsablauf

Für das Experiment wurde ein zweifaktorielles Design gewählt:

**Faktor 1: Hinweistyp** Es wurden folgende Warnausgabe-Typen unterschieden:

**Faktorstufe 1: Keine** Es erfolgt eine ausschließlich visuelle Präsentation des Reizes bzw. des Distraktors.

**Faktorstufe 2: Ungerichtet** Die visuelle Präsentation des Reizes oder Distraktors wird durch einen räumlich *ungerichteten* Warnton unterstützt.

**Faktorstufe 3: Gerichtet** Die visuelle Präsentation des Reizes oder Distraktors wird durch einen räumlich *gerichteten* Warnton unterstützt.

**Faktor 2: Richtung** Es werden die vier Faktorstufen vorne, links, rechts und hinten unterschieden.

Die zwölf Kombinationen der Faktoren *Hinweistyp* und *Richtung* wurden jedem Probanden viermal mit einem Zielreiz (Messwiederholung) und einmal mit einem Distraktor präsentiert. Tabelle 5.1 zeigt die Anzahl der Events pro Zelle für einen Probanden. Insgesamt werden damit 60 Events je Proband erhoben.

Nach dem Ausfüllen eines demografischen Fragebogens wurde ein Durchgang zur Eingewöhnung an den Versuchsablauf durchgeführt, der nicht in die Auswertung einfließt. Die 60 Events wurden in zufälliger Reihenfolge präsentiert. Der zeitliche Abstand zwischen den Events variierte zufällig zwischen fünf und neun Sekunden. Während des Versuchs mussten

	Zielreiz				Distraktor			
	vorne	hinten	links	rechts	vorne	hinten	links	rechts
<b>Kein Ton</b>	4	4	4	4	1	1	1	1
<b>Ungerichteter Ton</b>	4	4	4	4	1	1	1	1
<b>Gerichteter Ton</b>	4	4	4	4	1	1	1	1
<b>Summe Anzahl Events pro Proband</b>	<b>60</b>							

**Tabelle 5.1:** Versuchsplan mit Zellenbesetzung für einen Probanden

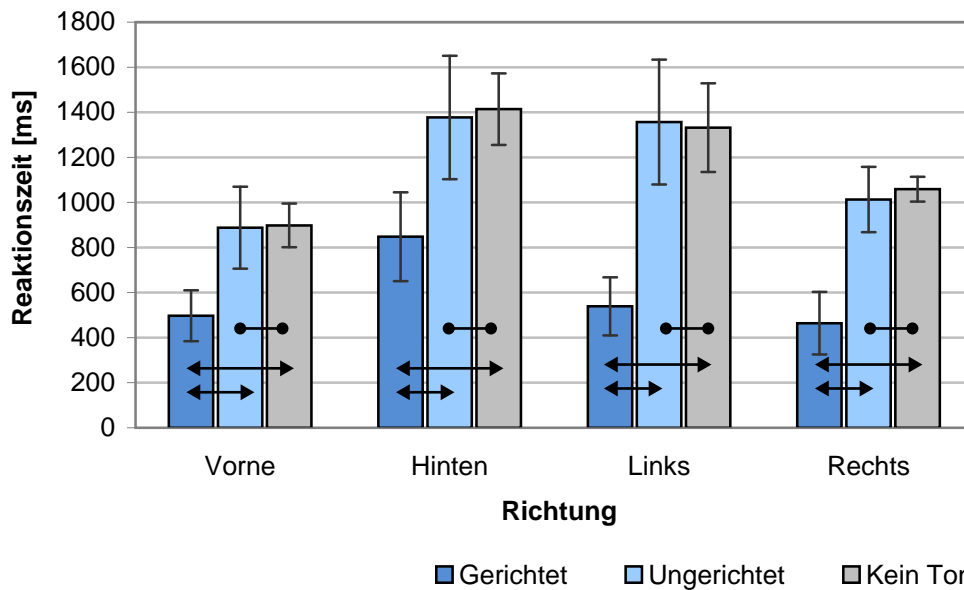
die Probanden den rechten Zeigefinger auf der mittleren Taste der Pfeiltastatur halten (*home-key*). Nach der Präsentation des Zielreizes sollten die Probanden so schnell wie möglich die entsprechende Richtungstaste drücken. Um anatomisch bedingte Zeitvorteile für einzelne Richtungen auszuschließen, erfolgte die Bestätigung der Richtung ebenfalls ausschließlich mit dem Zeigefinger.

### 5.1.3 Stichprobe

Insgesamt nahmen acht Versuchspersonen (eine weiblich, sieben männlich) im Alter von 20 bis 30 Jahren (Mittelwert 26 Jahre, Standardabweichung 3 Jahre) an der Untersuchung teil. Die Versuchspersonen waren BMW-Mitarbeiter, nach eigener Angabe rechtshändig und hatten keine Beeinträchtigungen des Gehörs. Ihr Sehvermögen war teilweise korrigiert auf verkehrstaugliches Sehvermögen.

	vorne		hinten		links		rechts	
	n	M (SD) in ms	n	M (SD) in ms	n	M (SD) in ms	n	M (SD) in ms
<b>Kein Ton</b>	154	898 (97)	52	1.414 (159)	75	1.332 (194)	127	1.059 (55)
<b>Ungerichtet</b>	156	888 (182)	137	1.377 (274)	147	1.357 (277)	153	1.013 (145)
<b>Gerichtet</b>	159	497 (113)	157	848 (197)	154	539 (129)	155	464 (139)

**Tabelle 5.2:** Wahlreaktionszeiten in Millisekunden (ms); Mittelwert (M), Standardabweichung (SD) und Anzahl der Messwerte (n) je nach Bedingung bei N = 8 Probanden (für jedes n sind max. 160 Werte möglich; die Differenz der Werte zu 160 ergibt die Anzahl der Fehler).



**Abbildung 5.4:** Grafische Darstellung der Wahlreaktionszeiten in Millisekunden (ms) je nach Richtung und Art des akustischen Hinweises

## 5.1.4 Ergebnisse

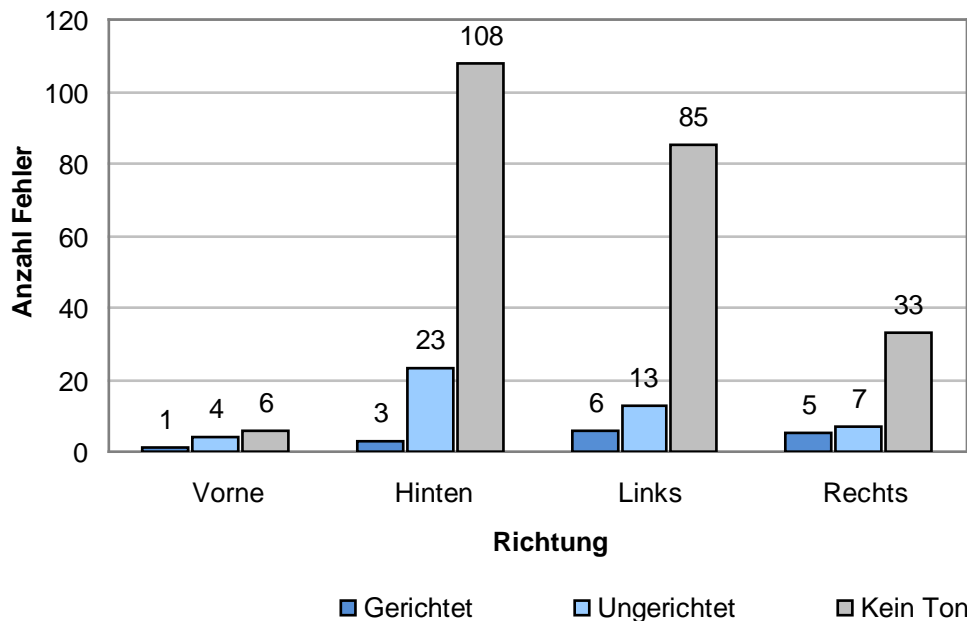
### Reaktionszeiten

Tabelle 5.2 und Abbildung 5.4 zeigen die Auswertung der Reaktionszeiten. Die Verteilung der Werte unter allen Bedingungen und Richtungen entspricht der Standard-Normalverteilung, weshalb parametrische Test-Verfahren Verwendung finden. Eine zweifaktorielle univariate Varianzanalyse ergab Haupteffekte für den Faktor *akustischer Hinweis*  $F(2,14) = 196.06$ ,  $p < .001$  und für den Faktor *Richtung*  $F(1.368, 9.574) = 21.78$ ,  $p = .001$ , korrigiert nach Greenhouse-Geisser. Die Interaktion der beiden Faktoren ist ebenfalls statistisch signifikant  $F(1.798, 12.585) = 4.41$ ,  $p = .039$ . Die Unterschiede zwischen den Bedingungen wurden über paarweise Vergleiche auf Signifikanz getestet. Die Unterschiede von räumlich gerichteten akustischen Hinweisen zu ungerichteten akustischen Hinweisen sowie zu keinen akustischen Hinweisen sind sehr signifikant (in beiden Fällen  $p < .001$ ). Nicht statistisch relevant dagegen ist der Unterschied zwischen räumlich ungerichteten akustischen Hinweisen und keinen akustischen Hinweisen ( $p = 1.000$ ).

### Fehler

Als Fehler wurden folgende Bedingungen gewertet:

- Keine Reaktion auf einen Zielreiz innerhalb von 2,5 Sekunden



**Abbildung 5.5:** Anzahl der Fehler je nach Art des akustischen Hinweises und der Richtung, in der ein Zielreiz präsentiert wurde (pro Säule sind 160 Fehler möglich)

- Reaktion (Loslassen der mittleren Taste oder Drücken einer Richtungstaste) auf einen Distraktor innerhalb des 2,5-Sekunden-Fensters
- Loslassen der mittleren Taste aber keine Auswahl einer Richtung im Falle eines Zielreizes
- Wählen einer falschen Richtung im Falle eines Zielreizes

Bei der Verteilung der Fehler in Abbildung 5.5 fällt auf, dass sehr viele Fehler unter der Bedingung kein akustischer Hinweis auftreten. Unter der Bedingung räumlich ungerichteter akustischer Hinweis sind es dagegen weitaus weniger und bei räumlich gerichteten akustischen Hinweisen sind kaum Fehler vorhanden.

### 5.1.5 Diskussion

Die Ergebnisse zeigen den positiven Einfluss eines gerichteten Tons auf die Entdeckungsleistung und die Reaktionsgeschwindigkeit. Die Reaktionszeiten sind bei der Präsentation eines gerichteten Tons signifikant kürzer. Dies gilt für alle vier untersuchten Richtungen. Die Probanden nutzen die akustische Richtungsinformation, um den visuellen Reiz zu finden. Die Reaktionszeiten zwischen den Bedingungen *Kein Ton* und *Ungerichteter Ton* unterschieden sich nicht, obwohl auch hier eine weitere Abstufung zu erwarten wäre. Betrachtet man jedoch die Anzahl der gültigen Messungen (Tabelle 5.2) bzw. die Anzahl der Fehler (Abbildung 5.5),

so wird klar, dass sich diese teilweise stark unterscheiden. Wenn die Probanden in der Bedingung *Kein Ton* einen visuellen Reiz entdecken (was weniger oft der Fall ist), dann ist die Reaktionszeit ähnlich groß wie bei der Präsentation eines ungerichteten Tons (bei dem ebenfalls alle Monitore abgesehen werden müssen).

## 5.2 Nachweis des Effekts im Fahrsimulationsversuch

Der Vorversuch hat gezeigt, dass durch einen gerichteten akustischen Hinweis die Reaktion auf einen visuellen Reiz beschleunigt werden kann. Ein Fahrsimulationsversuch soll zeigen, ob sich der Effekt auch auf Kreuzungssituationen im städtischen Bereich abbilden lässt. Hierzu wurde eine Versuchsstrecke im Simulator implementiert, auf der die Probanden mit mehreren kritischen Verkehrssituationen konfrontiert sind. Die Situationen sind so gestaltet, dass die Gefahr oder das gefährdete Objekt in jeweils unterschiedlichen Richtungen auftaucht. Eine Probandengruppe wird von einem Warnsystem mit gerichteten Warntönen unterstützt, während der Vergleichsgruppe lediglich ein ungerichteter Warnton präsentiert wird.

### 5.2.1 Versuchsbeschreibung und Versuchsablauf

Der Versuch wurde in einem statischen Simulator der BMW Group durchgeführt (schematischer Aufbau siehe Abbildung 5.6). Es handelt sich dabei um eine Fünf-Kanal-Projektion, die dem Fahrer das gesamte Sichtfeld durch die Windschutzscheibe und die beiden Seitenscheiben zur Verfügung stellt. Zusätzlich stellen drei Plasmabildschirme die Ansichten in den Rückspiegeln dar. Ein Head-up-Display, bestehend aus einem lichtstarken LCD Monitor und einer Combiner-Scheibe, wird zur Anzeige der gefahrenen Geschwindigkeit und der Navigationshinweise während der Versuchsfahrten verwendet (Abbildung 5.8).

In einem ersten Versuchsaufbau waren zur Ausgabe der gerichteten Warnungen fünf Lautsprecher außerhalb der Sitzkiste in den Richtungen  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $160^\circ$ ,  $200^\circ$  und  $270^\circ$  vorgesehen. Allerdings konnten die Probanden die Schallquellen bedingt durch den Aufbau der Sitzkiste und die Raumakustik nur schlecht orten. Deshalb kamen in einem modifizierten Aufbau kleinere Lautsprecher zum Einsatz, die innerhalb der Sitzkiste und damit näher am Probanden montiert waren (Abbildung 5.7). Als Warnsignal wurde erneut der Warnton aus dem Vorversuch verwendet. Die Lautstärke des Warntons betrug unter allen Bedingungen etwa  $75 \text{ dB(A)}$  ( $\pm 0,9 \text{ dB}$ ) im Kopfbereich des Probanden. Das simulierte Umgebungsgeräusch beträgt an gleicher Stelle bei einer Fahrgeschwindigkeit von  $50 \text{ km/h}$  ca.  $62 \text{ dB(A)}$ .

Es wurde ein Simulationskurs mit neun Warnsituationen, von denen drei Situationen Fehlwarnungen waren, implementiert. Die folgende Liste gibt die Situationen und die entsprechende Richtung des Warntons in chronologischer Reihenfolge knapp wieder. Alle Proban-



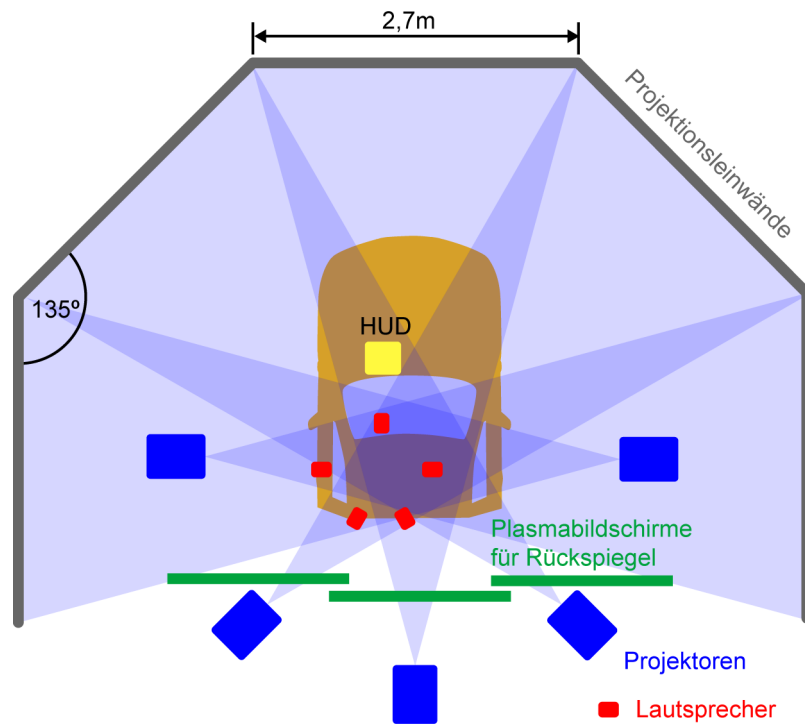


Abbildung 5.6: Aufbau des statischen Simulators

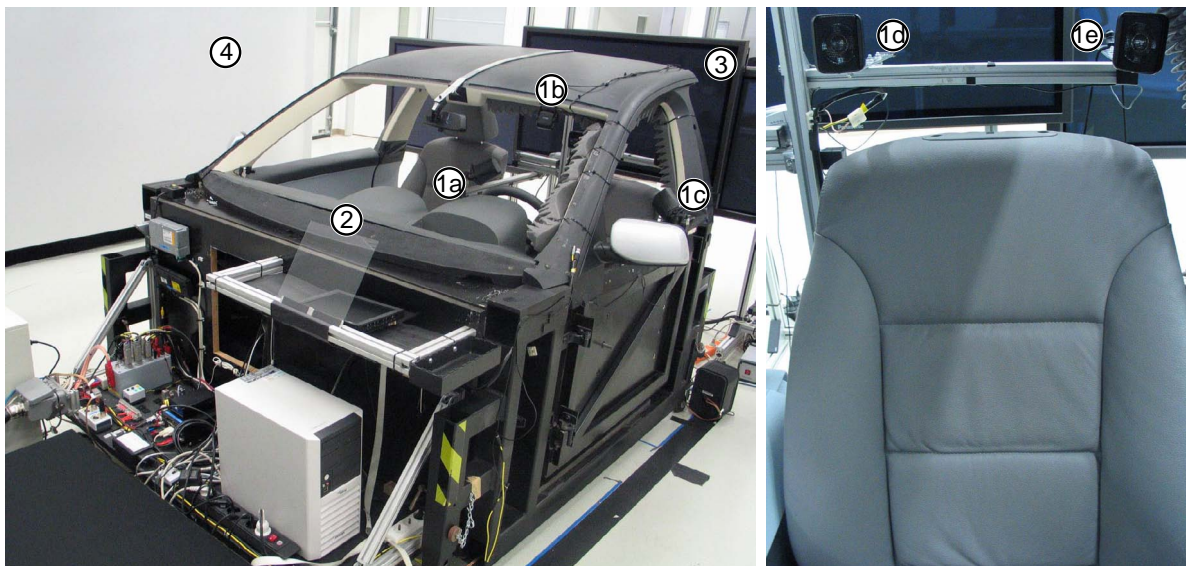
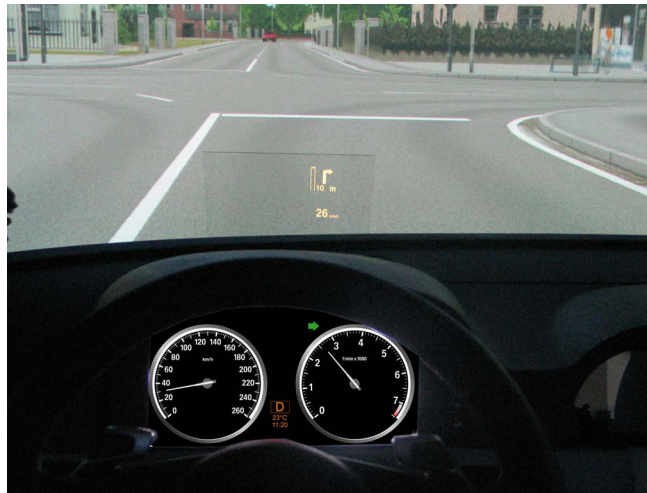


Abbildung 5.7: Sitzkiste für den Hauptversuch mit den fünf Lautsprechern (1a-e), dem Head-up-Display (2), den Plasmabildschirmen für die Rückansicht (3) und den Projektionsleinwänden für die Front- und Seitenansicht (4)



**Abbildung 5.8:** Anzeigen in der Sitzkiste aus Sicht des Probanden

den durchführen die Situationen in der gleichen Reihenfolge. Eine randomisierte Anordnung war aufgrund von Einschränkungen in der Simulationssoftware nicht möglich. Eine ausführliche Beschreibung der Situationen findet sich in Anhang B.3 und die Streckenführung in Anhang B.2.

**1 Fehlwarnung „Auffahren“, Richtung: vorne**

Ausgabe einer Auffahrwarnung, obwohl keine Gefahr besteht.

**2 Gefahrensituation „Bus“, Richtung: vorne**

Ein Fußgänger überquert vor einem wartenden Bus die Straße.

**3 Fehlwarnung „Gegenverkehr“, Richtung: vorne**

Warnung vor ungefährlichem Gegenverkehr.

**4 Gefahrensituation „Spurwechsel“, Richtung: hinten links**

Der Fahrer will einen parkenden LKW überholen und übersieht dabei ein Fahrzeug auf der Nebenspur.

**5 Fehlwarnung „Fußgänger“, Richtung: rechts**

Warnung vor einem Fußgänger auf dem Gehweg.

**6 Gefahrensituation „Linksabbiegen“, Richtung: links**

Der Fahrer will links abbiegen und übersieht dabei einen Fußgänger.

**7 Gefahrensituation „Querverkehr“, Richtung: rechts**

Der Fahrer missachtet die Vorfahrt an einer rechts-vor-links-Kreuzung.

**8 Gefahrensituation „Radfahrer“, Richtung: hinten rechts**

Der Fahrer will rechts abbiegen und übersieht einen Radfahrer.

**9 Gefahrensituation „Querverkehr 2“, Richtung: links**

Der Fahrer missachtet die Vorfahrt an einer rechts-vor-links-Kreuzung.

Die Situationen waren so angelegt, dass eine Kollision durch ein Bremsmanöver vermeidbar ist. Die Fehlwarnungen und insbesondere der Start mit einer Fehlwarnung sollen die Probanden dazu bringen, die Situation zu analysieren, bevor sie ein Bremsmanöver einleiten. Dies soll einem reinen Reiz-Reaktions-Schema vorbeugen.

Der Versuch startete mit dem Ausfüllen eines demographischen Fragebogens und einer ca. fünf Minuten langen Eingewöhnungsfahrt. Während der eigentlichen Versuchsfahrt, die etwa 22 Minuten dauerte, wurden die Blicke der Probanden durch das DIKABLIS System aufgezeichnet (Lange u. a., 2006a). Im Anschluss wurde in einer dritten Fahrt die akustische Lokalisationsleistung der Probanden überprüft. Dabei wurde der Warnton insgesamt zehnmal aus jeder Richtung präsentiert (unabhängig von der Verkehrssituation). Die Richtung der aufeinanderfolgenden Töne wurde dabei randomisiert und der Proband sollte verbal die jeweils wahrgenommene Richtung angeben.

### 5.2.2 Versuchsplan

Im Gegensatz zum Vorversuch im Labor wurde im Hauptversuch ein Between-Subjects-Design verwendet. Eine Probandengruppe erhielt immer eine gerichtete akustische Warnung in den Gefahren- und Fehlwarnsituationen. Die andere Probandengruppe erhielt immer eine ungerichtete akustische Warnung. Die Art des akustischen Hinweises war die unabhängige Variable im Versuch.

Die folgenden abhängigen Variablen und Hypothesen wurden untersucht:

#### **Bremsreaktionszeit/Lenkreaktionszeit**

Die Zeit vom Auslösen der Warnung bis zu einer merklichen Brems- oder Lenkreaktion des Probanden.

##### **Hypothese 1**

Räumlich gerichtete akustische Warnungen führen in kritischen Fahrsituationen zu schnelleren Reaktionen im Vergleich zu räumlich ungerichteten akustischen.

##### **Hypothese 2**

Räumlich *falsch* gerichtete akustische Warnungen verschlechtern die Bremsreaktionszeiten gegenüber ungerichteten Warnungen.

#### **Blickreaktionszeit**

Die Zeit zwischen Beginn der akustischen Warnung und dem fovealen Sehen der Gefahr.

##### **Hypothese 3**

Die Blickreaktionszeiten sind bei gerichteten akustischen Warnungen kürzer.

#### **Anzahl der Fixationen**

Die Anzahl der Fixationen, die nach Ertönen der akustischen Warnung getätigt werden, bis auf das gefährliche bzw. gefährdete Objekt geschaut wird.

#### Hypothese 4

Die Anzahl der Fixationen ist bei gerichteten akustischen Warnungen geringer als bei ungerichteten akustischen Warnungen.

### 5.2.3 Stichprobe

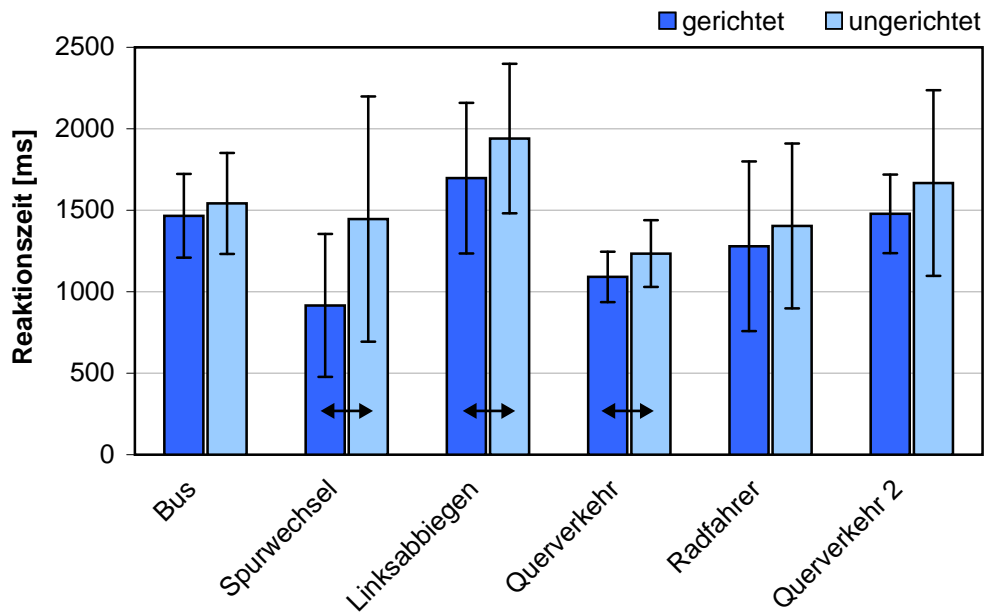
Insgesamt nahmen 55 Personen, davon 14 Frauen und 41 Männer, an der Untersuchung teil. Die Probanden waren im Schnitt 33 Jahre alt (Altersbereich von 22 bis 51 Jahren) und waren alle Mitarbeiter der BMW Group. Acht Personen mussten den Versuch aufgrund von Simulatorkrankheit vorzeitig abbrechen. Jeder der 55 Versuchspersonen besaß nach eigenen Angaben einen PKW-Führerschein und keiner von ihnen hatte am Vorexperiment teilgenommen.

### 5.2.4 Ergebnisse

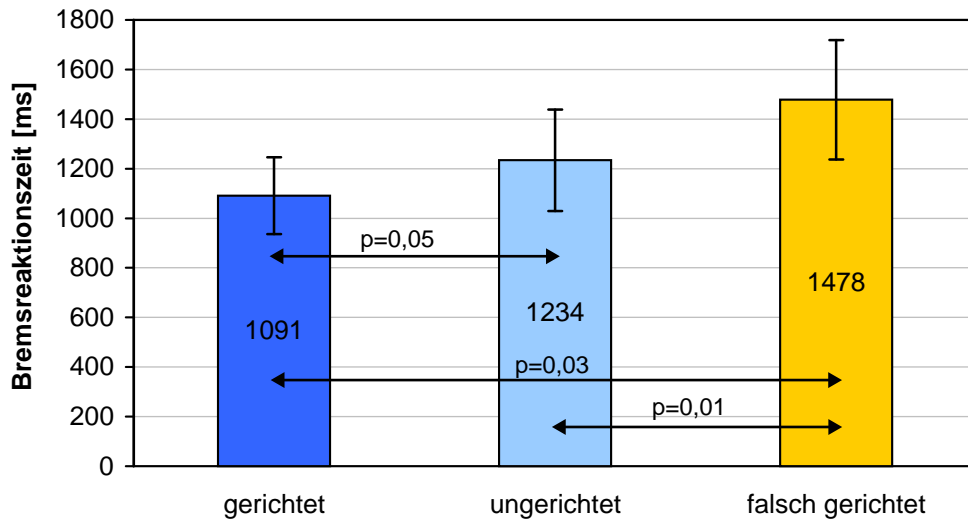
#### Brems-/Lenkreaktionszeit

Tabelle 5.3 zeigt die Reaktionszeiten sowie die Anzahl der Messungen pro Zelle. Nur in der Situation *Bus* (Gefahrensituation 2) liegen für alle Probanden, die den Versuch bis zum Ende absolvierten, Messungen vor. In allen anderen Situationen kamen hohe Ausfälle durch ein Versagen der Situationslogik oder durch nicht klassifizierbare Reaktionen der Probanden hinzu. Da die meisten Situationen eine komplexe Abfolge von erfüllten Bedingungen voraussetzen, war mit dieser hohen Ausfallquote zu rechnen. In der Situation *Radfahrer* (Gefahrensituation 8) wurde die Lenkreaktionszeit als abhängige Variable herangezogen. Das Abbiegemanöver erforderte ein Verzögern, bevor der Radfahrer im toten Winkel auftauchte. Dies machte eine Bestimmung der Bremsreaktion unmöglich. Allerdings war in den aufgezeichneten Daten ein markantes Gegenlenken als Reaktion auf den plötzlich auftretenden Radfahrer zu erkennen. In allen übrigen Situationen konnte der Reaktionszeitpunkt gut über die Bremsreaktion ermittelt werden.

Die Daten wurden mittels eines Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstests auf Normalverteilung geprüft. Da dieser Test normalverteilte Daten ergab, konnten parametrische Testverfahren für die weitere Analyse herangezogen werden. Abbildung 5.9 zeigt die Reaktionszeiten aus Tabelle 5.3 in einer Diagrammdarstellung. Die Unterschiede wurden mittels eines T-Tests für unabhängige Stichproben auf Signifikanz geprüft. Da aufgrund der Ergebnisse aus dem Vorexperiment gerichtete Hypothesen zugrunde liegen, wurde einseitig getestet. Signifikante Unterschiede sind mittels eines Doppelpfeils in der Grafik veranschaulicht. Die dazugehörigen p-Werte sind in Tabelle 5.3 aufgeführt.



**Abbildung 5.9:** Mittelwert und Standardabweichung der Reaktionszeiten (im Falle Radfahrer die Lenkreaktionszeit, für alle übrigen die Bremsreaktionszeit)



**Abbildung 5.10:** Mittelwert und Standardabweichung der Reaktionszeiten für die Querverkehrssituation

	Gerichteter Warnton			Ungerichteter Warnton			T-Test
	n	M in ms	SD in ms	n	M in ms	SD in ms	Einseitige Signifikanz
<b>Bus</b>	24	1466	257	23	1542	310	0,18
<b>Spurwechsel</b>	13	916	439	8	1446	752	0,05
<b>Linksabbiegen</b>	21	1697	462	20	1940	459	0,05
<b>Querverkehr</b>	10	1091	455	11	1234	205	0,05
<b>Radfahrer</b>	15	1279	521	10	1404	506	0,23
<b>Querverkehr 2</b>	11	1478	241	6	1667	570	0,17

**Tabelle 5.3:** Anzahl gültiger Werte, Mittelwert und Standardabweichung der Reaktionszeiten (im Falle *Radfahrer* die Lenkreaktionszeit, für alle übrigen die Bremsreaktionszeit) sowie p-Wert des T-Tests bei einseitiger Testung des Unterschieds der beiden Gruppen

Die Hypothese 1, dass gerichtete Warntöne zu einer schnelleren Reaktion führen, konnte somit zumindest für einen Teil der Situationen bestätigt werden. Es ist naheliegend, dass der Unterschied zwischen den beiden Bedingungen geringer ist, wenn die Quelle der Gefahr im vorderen Sichtfeld liegt, da die Aufmerksamkeit des Fahrers ohnehin nach vorne gerichtet ist. Aus diesem Grund unterscheiden sich die Reaktionszeiten in der Situation *Bus* nicht signifikant. Dies deckt sich auch mit den Ergebnissen aus dem Vorversuch (siehe Abschnitt 5.1.4). Gerade im hinteren Bereich, wie beispielsweise in der Situation *Spurwechsel*, ist der positive Einfluss einer gerichteten akustischen Warnung höher. Auch dies deckt sich mit den Ergebnissen aus dem Laborversuch. Insgesamt erschwerten die geringe Anzahl an gültigen Werten und die großen Streuungen der Reaktionszeiten die Auswertung. Tendenziell sind auch bei der Situation *Radfahrer* kürzere Reaktionszeiten unter der Bedingung *gerichtete Warntöne* aufgetreten. Ein signifikanter Unterschied ließ sich allerdings nicht finden.

In Abbildung 5.10 sind die Reaktionszeiten für die Gefahrensituationen 7 und 9, *Querverkehr* und *Querverkehr 2* gegenübergestellt. Die beiden Situationen sind bezüglich des Timings der Verkehrsteilnehmer identisch und unterscheiden sich lediglich in der Präsentation des Warntons aus der gegenüberliegenden Richtung bei der Situation *Querverkehr 2*. Die Werte für die Säulen *gerichtet* und *ungerichtet* entstammen der Probandengruppe *gerichtet* bzw. *ungerichtet* für die Situation *Querverkehr*. Der Wert für die Säule *falsch gerichtet* setzt sich aus den Reaktionen auf die falsch gerichtete akustische Warnung in der Situation *Querverkehr 2* zusammen. Alle Vergleiche über einseitige T-Tests sind signifikant auf dem 5% Signifikanzniveau (p-Werte siehe Abbildung 5.10). Somit ist die Hypothese 2, dass falsch gerichtete Warntöne die Reaktionszeit negativ beeinflussen, für diese Querverkehrssituation nachgewiesen.

### Blickreaktionszeit und Fixationen

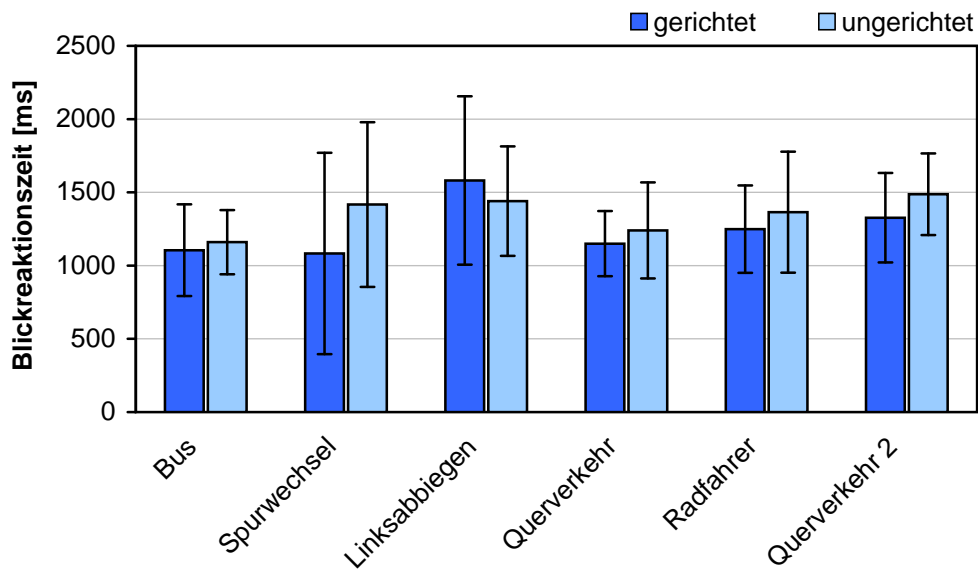
Mittels eines Blickerfassungssystems wurde die Zeitdauer bestimmt, die die Probanden ab dem Zeitpunkt der Warnung benötigen, um die Gefahr oder das gefährdete Objekt zu fixieren. Abbildung 5.11 stellt die Reaktionszeiten grafisch dar. Tabelle 5.4 gibt die Daten textuell wieder. Da die Daten normalverteilt sind, wurden parametrische Testverfahren verwendet. T-Tests für unabhängige Stichproben lieferten bei zweiseitiger Testung keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Probandengruppen. Bis auf einen Ausreißer (*Linksabbiegen*) lässt sich für die Situationen *Bus*, *Spurwechsel*, *Querverkehr* und *Radfahrer* zumindest noch eine Tendenz feststellen. Die Hypothese 3 kann damit statistisch nicht bestätigt werden.

Obwohl in der Situation *Querverkehr 2* unter der Bedingung *gerichtet* der Warnton aus einer falschen Richtung präsentiert wurde, waren die Reaktionszeiten kürzer. Dieser Befund ist aufgrund der geringen Zellenbesetzung von nur sechs Probanden unter der Bedingung *Querverkehr 2/ungerichtet* nicht aussagekräftig. Vergleicht man jedoch die Bedingungen *Querverkehr/gerichtet*, *Querverkehr/ungerichtet* und *Querverkehr 2/gerichtet* ergibt sich wieder die in Abbildung 5.10 für die Bremsreaktionszeiten dargestellte „Treppe“. Die negative Auswirkung der falsch gerichteten Warnung ist also auch in den Blickdaten nachweisbar, allerdings wiederum nur tendenziell. T-Tests für unabhängige Stichproben lieferten keinen signifikanten Unterschied.

Die durchschnittliche Anzahl an Fixationen, bevor die Probanden die Gefahr oder das gefährdete Objekt fixieren, ist ebenfalls in Tabelle 5.4 dargestellt. In einigen Situationen ist wiederum eine Tendenz feststellbar, jedoch treten keine signifikanten Unterschiede auf. Die Hypothese 4 kann damit statistisch nicht bestätigt werden.

### Lokalisationsfähigkeit

In einer weiteren Versuchsfahrt wurden zur Kontrolle der akustischen Lokalisationsfähigkeit der Probanden Warntöne aus verschiedenen Richtungen präsentiert. Die Ausgabe erfolgte unabhängig von kritischen Situationen und wurde für jede Richtung zehnmal wiederholt, wobei die Reihenfolge der Richtungen randomisiert war. Die Töne wurden vom Versuchsleiter manuell ausgelöst, daraufhin äußerten die Probanden die Richtungsangaben verbal. In Abbildung 5.12 ist die durchschnittliche Anzahl korrekter Antworten dargestellt. Vor allem die hinteren Lautsprecher wurden nur unzureichend oft korrekt identifiziert, was hauptsächlich dem Versuchsaufbau zuzuschreiben ist. Trotz Maßnahmen zur Reflexionsunterdrückung in der Sitzkiste konnte der Aufbau offenbar nicht ausreichend schalltot gestaltet werden. Die Überprüfung der Lokalisationsfähigkeit erfolgte jedoch hauptsächlich um Unterschiede durch Prädisposition in den Probandengruppen auszuschließen. Von einer hundertprozentig korrekten Lokalisationsfähigkeit in allen Richtungen in einem realen Fahrzeug auszugehen ist



**Abbildung 5.11:** Zeitdauer vom Zeitpunkt der Warnung bis zur ersten Fixation des in der jeweiligen Situation gefährlichen bzw. gefährdeten Objektes

ohnehin unrealistisch. Der Unterschied zwischen den beiden Bedingungen ist bei zweiseitiger Testung statistisch nicht signifikant ( $T(44) = 1,379$ ;  $p = 0,175$ ; T-Test für unabhängige Stichproben). Daher ist anzunehmen, dass sich die beiden Versuchsgruppen bezüglich ihrer Lokalisationsfähigkeit im verwendeten Versuchsaufbau nicht voneinander unterscheiden.

### 5.3 Fazit & Diskussion

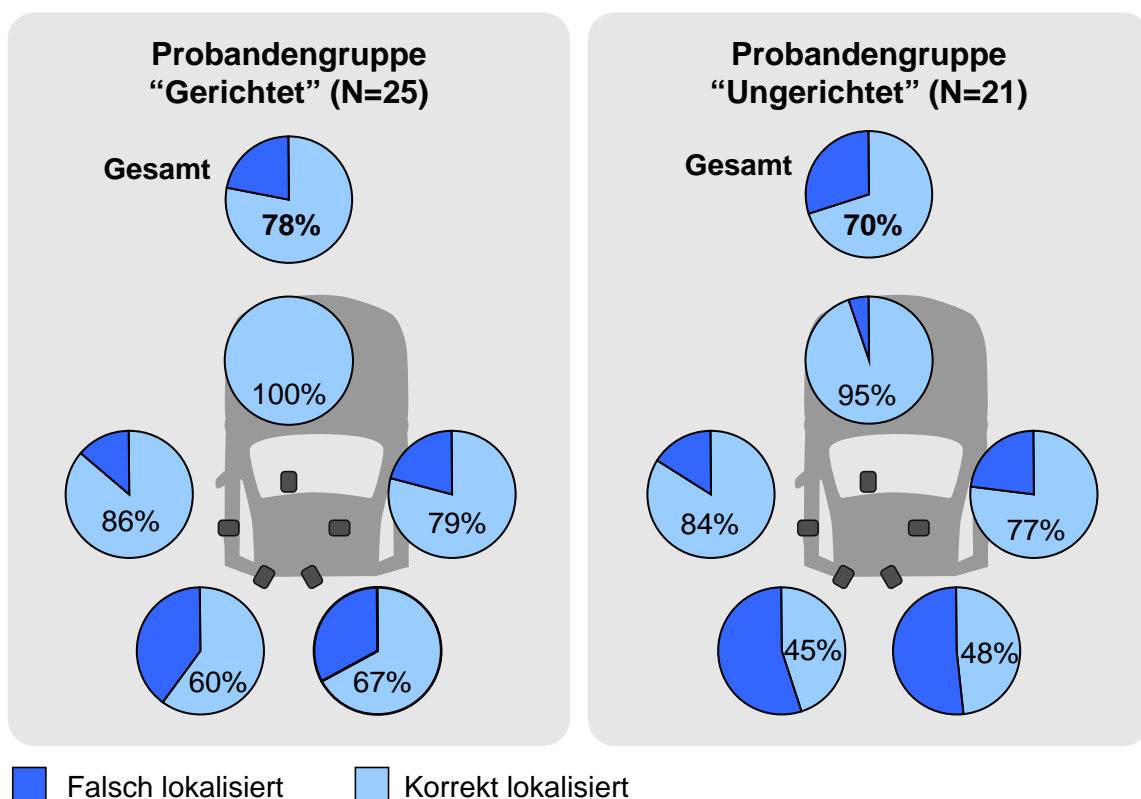
Der Versuch zeigt, dass Gefahren im hinteren, linken und rechten Bereich um das Fahrzeug vom Fahrer schneller wahrgenommen werden, wenn eine akustische Warnung aus der entsprechenden Richtung erfolgt. Dies drückt sich in verkürzten Reaktionszeiten aus. In diesem Experiment wurde auf eine Unterscheidbarkeit der Art der Warnung bewusst verzichtet. Bereits die Ergebnisse aus Kapitel 4 lassen den Schluss zu, dass diese Unterscheidbarkeit in vielen Situationen entbehrlich ist. Auch in diesem Experiment ließen sich keine Indizien für Nachteile in der Art oder Schnelligkeit der Reaktion auf die Gefahrensituationen erkennen. Eine rein akustische Warnung – wie im Experiment verwendet – hat den Vorteil, dass die visuelle Aufmerksamkeit des Fahrers nicht auf eine Anzeige im Fahrzeuginnenraum gelenkt wird. Zur Sicherstellung der Erkennung der Warnung wird in der Praxis jedoch eine Kombination mit einer visuellen Warnung notwendig sein.

Prinzipiell stellt sich die Frage nach der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Realität. Im Gegensatz zum Videoszenarioversuch in Kapitel 4 entstammen die hier gefundenen Aussagen einem Simulatorversuch, in dem die Probanden selbständig einen Streckenkurs durchführen.



	Gerichteter Warnton				Ungerichteter Warnton			
	n	M [ms]	SD [ms]	Fixationen	n	M [ms]	SD [ms]	Fixationen
<b>Bus</b>	21	1.105	313	3,19	19	1.160	219	3,95
<b>Spurwechsel</b>	12	1.083	687	2,17	7	1.417	562	3,43
<b>Linksabbiegen</b>	19	1.581	575	3,11	16	1.440	374	3,25
<b>Querverkehr</b>	8	1.150	222	3,25	11	1.240	328	3,00
<b>Radfahrer</b>	13	1.249	298	2,38	8	1.365	413	2,63
<b>Querverkehr 2</b>	11	1.327	305	3,45	6	1.487	279	4,00

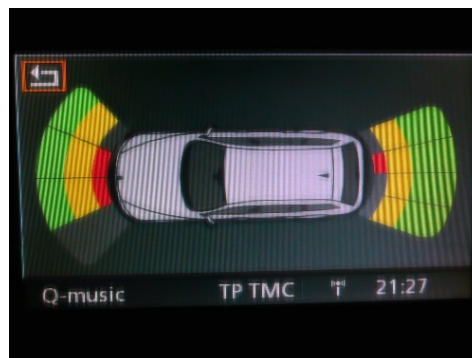
**Tabelle 5.4:** Anzahl gültiger Werte, Mittelwert und Standardabweichung der Blickreaktionszeiten sowie die mittlere Anzahl der Fixationen bis zum erkennen der Gefahr oder des gefährdeten Objekts



**Abbildung 5.12:** Lokalisationsleistung der beiden Probandengruppen

Es ist deshalb davon auszugehen, dass die externe Validität dieses Experiments ungleich höher ist. Gleichzeitig gestaltete sich der Nachweis der Effekte durch große Streuungen in den Reaktionszeiten deutlich schwieriger. Darüber hinaus stellt dieses Experiment wesentlich höhere Anforderungen an die Probanden. Entsprechend ergab sich eine höhere Ausfallquote durch Simulatorkrankheit. Vor allem starke Brems-Manöver bereiten selbst erfahrenen Probanden größere Schwierigkeiten. Eine weitere Steigerung der Kritikalität der Situationen, der Dauer des Experiments oder der Anzahl der Situationen ist nicht realistisch. Auch die Verwendung eines dynamischen Fahrmodulators bringt hier keine Verbesserung, da gerade die Kinematik von Abbiege- und Bremsmanövern nur unzureichend abgebildet werden kann.

Räumlich gerichtete Hinweistöne werden bereits heute in Fahrzeugen der BMW Group verwendet um den Fahrer beim Einparken zu unterstützen. Zusätzlich zu einer visuellen Darstellung des Fahrzeugumfelds (Abbildung 5.13) zeigt ein Ton in unterschiedlicher Pulsfrequenz und Ursprungsrichtung die Abstände zu relevanten Hindernissen an. Die vorhandene Technik lässt sich auch für die Ausgabe räumlich gerichteter akustischer Warnungen nutzen. Darüber hinaus hält in Fahrzeugen der Oberklasse die aus der Unterhaltungselektronik bekannte Mehrkanal-Tonsystem-Technik Einzug (z.B. Dolby Digital). Damit ist es möglich, virtuelle Schallquellen frei im Raum um den Fahrer herum zu positionieren. Eine optimale Abstimmung der Lautsprecherkonfiguration auf den Fahrzeuginnenraum und dessen akustischen Eigenschaften stellt sicher, dass die Schallquellen vom Fahrer gut lokalisiert werden können. Es ist anzunehmen, dass die Technik in Zukunft nicht nur Fahrern von Oberklassefahrzeugen vorbehalten bleibt und daher durchaus für räumlich gerichtete Hinweistöne eingesetzt werden kann.



**Abbildung 5.13:** Anzeigen der Einparkhilfe *Park Distance Control* (PDC) im BMW

# OPTIMIERUNG VON GESCHWINDIGKEITSEMPFEHLUNGEN AN LICHTSIGNALANLAGEN

---

Lichtsignalanlagen leisten seit ihrer Einführung in den 1920er Jahren einen wichtigen Beitrag für den reibungslosen und sicheren Straßenverkehr. Gleichzeitig aber gibt es — fast genauso lange — Bestrebungen, die negativen Effekte solcher Anlagen möglichst gering zu halten. Für den einzelnen Autofahrer stellt eine rote Ampel primär ein Hindernis dar, welches die Reisezeit in nicht unerheblichem Maße erhöht. In den Fokus rückt mittlerweile auch der Kraftstoffmehrverbrauch, der durch ungünstige Ampelschaltungen oder ein unangepasstes Fahrverhalten auf den Zufahrten von Kreuzungen entsteht. Die verschiedenen Maßnahmen lassen sich in folgende Bereiche gliedern:

**Optimierung der Ampelschaltungen** Um die Reisezeit und den Verkehrsdurchsatz global zu erhöhen, versuchen Verkehrsplaner die Ampelschaltungen vor allem in Ballungsräumen aufeinander abzustimmen. Darüber hinaus bieten die bedarfsgesteuerte Schaltung von Ampeln über Induktionsschleifen in der Fahrbahn oder die Anpassung der Schaltzeiten an die Tageszeit weiteres Verbesserungspotenzial. Ein Beispiel für die tageszeitabhängige Anpassung ist die wechselnde Priorisierung der Ein- bzw. Ausfallstraßen im Berufsverkehr. Die Optimierung eines komplexen Straßennetzes mit vielen über Lichtsignale geregelten Knotenpunkten ist seit vielen Jahren ein wichtiger Bereich der Verkehrsforschung (z.B. de Oliveira u. a. (2006); Hewage und Ruwanpura (2004)). Obwohl es zunächst kontraproduktiv klingt, lassen sich in einigen Fällen sogar Verbesserungen durch zusätzliche Signale erzielen. Palekar (2006) berichtet von einer Reduzierung der Reisezeit, indem einige hundert Meter vor der eigentlichen Ampelanlage bzw. Kreuzung zusätzliche „Vor-Signale“ aufgestellt werden. Diese sind zeitlich leicht versetzt zu den Hauptsignalen an der Kreuzung geschaltet und führen so zu einem verringerten

Zeitbedarf beim Anfahrvorgang, denn die Beschleunigung auf die Reisegeschwindigkeit findet im Bereich zwischen dem Vor- und dem Hauptsignal statt und nicht erst im Kreuzungsbereich.

**Beeinflussung des Fahrverhaltens** Eine Abstimmung der Lichtsignalanlagen an den Knotenpunkten setzt zum Teil ein kooperatives Verhalten der einzelnen Verkehrsteilnehmer voraus, beispielsweise die Einhaltung einer bestimmten Richtgeschwindigkeit für das Durchfahren mehrerer Knotenpunkte in Folge. Wird die entsprechende Richtgeschwindigkeit nicht eingehalten, kommt der positive Effekt einer vernetzten Steuerung der Ampeln möglicherweise nicht zum Tragen. Auch birgt die individuelle Beeinflussung einzelner Fahrer bzw. Fahrzeuge einen zusätzlichen Nutzen, denn nicht immer ist eine Empfehlung für alle Verkehrsteilnehmer gleich. Es ist vorstellbar, dass eine Empfehlung abhängig vom Abstand des Fahrzeugs von der Ampel ausgesprochen wird. In Richter (2005) wird das Kraftstoffsparpotenzial einer Geschwindigkeitsvorgabe im Bereich von Ampelanlagen mit 15% im Mittel für eine Zufahrt angegeben und Trayford u. a. (1987) weist eine Einsparung von 9,8% im Mittel nach. In Hoffmann (1989) wird eine Einsparung von 11% des verbrauchten Kraftstoffs ermittelt.

**Stillstandsmanagement** Da sich auch mit einer intelligenten Signalsteuerung und entsprechenden Empfehlungen die Standzeiten nicht vollständig vermeiden lassen, haben mittlerweile einige Automobilhersteller das Stillstandsmanagement optimiert. Hält das Fahrzeug an, schalten sich beispielsweise der Motor oder andere Fahrzeugkomponenten automatisch ab. Diese Funktion ist beispielsweise innerhalb der EfficientDynamics Strategie von BMW (BMW Group, 2007b) oder als Teil des Micro Hybrid Drive im Smart umgesetzt (Daimler AG, 2008).

## **6.1 Bekannte Konzepte und deren Beurteilung**

Die Wirksamkeit von optimierten Ampelschaltungen und einem verbesserten Stillstandsmanagement ist überwiegend von den durch Verkehrsplaner und Hersteller gewählten Strategien und Algorithmen abhängig. Der Erfolg einer direkten Beeinflussung des Fahrverhaltens einzelner Fahrer hängt jedoch stark von der gewählten Mensch-Maschine-Schnittstelle ab und auch von der Bereitschaft der Fahrer, die entsprechenden Empfehlungen umzusetzen. In den letzten Jahrzehnten gab es immer wieder Bestrebungen, eine Einflussnahme mittels Geschwindigkeitsempfehlungen umzusetzen. Der folgende Abschnitt soll die existierenden Lösungen und Ansätze für die Empfehlung von Geschwindigkeiten an Lichtsignalanlagen darstellen.

### **6.1.1 Statische *Grüne Welle* Beschilderung**

Die gängigste Strategie ist die logische und zeitliche Kopplung mehrerer aufeinanderfolgenden Signalanlagen. Dabei werden die Schaltzustände der Ampeln so aufeinander abge-

stimmt, dass ein Fahrzeug, das mit einer bestimmten Geschwindigkeit fährt (meist die zulässige Höchstgeschwindigkeit), ohne anzuhalten mehrere Ampeln passieren kann. So kann der Verkehr auf einer Hauptverkehrsstraße gegenüber den Fahrzeugen auf Nebenstraßen höher priorisiert werden. Dieses Prinzip ist bekannt unter dem Namen „Grüne Welle“ und fand auch Einzug in die deutsche Straßenverkehrs-Ordnung (StVO) (Deutsches Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 1970) in Form eines Zusatzzeichens (siehe Abbildung 6.1). Dadurch ist es dem Fahrer eines PKW möglich, die Fahrgeschwindigkeit entsprechend anzupassen.



**Abbildung 6.1:** StVO Zusatzzeichen Nr. 1012-34 zur Kennzeichnung einer abgestimmten Ampelschaltung

### 6.1.2 Dynamische *Grüne Welle* Beschilderung

Eine statische Beschilderung erlaubt es allerdings nicht, den Abstand zur Ampel mit der verbleibenden Zeit in der entsprechenden Ampelphase in Bezug zu setzen. Aus diesem Grund sind beispielsweise in den Niederlanden (siehe Abbildung 6.2) oder Kanada (Teply und Schnab-ler, 1990) dynamische Beschilderungen am Straßenrand im Einsatz.



**Abbildung 6.2:** Dynamische Grüne-Welle-Anzeige am Straßenrand in den Niederlanden

### 6.1.3 Individuelle Geschwindigkeitsempfehlungen im Fahrzeug

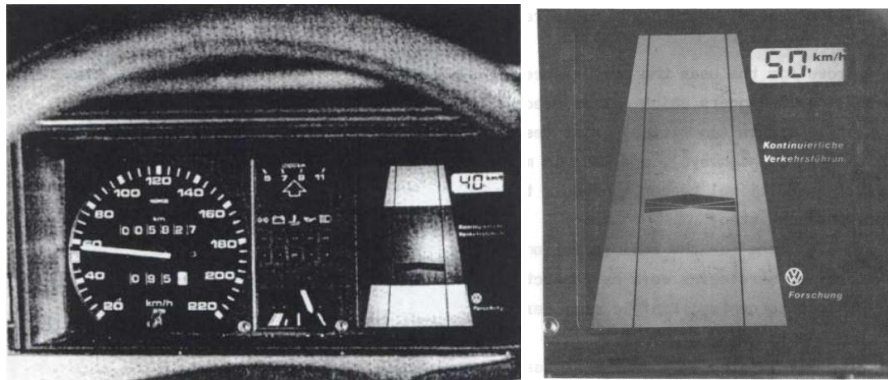
Dieser Aufgabe widmete sich bereits in den 80er Jahren das Projekt „Wolfsburger Welle“ (Zimdahl, 1984; Walzer und Zimdahl, 1988). Ein Ziel war es, dem Fahrer eine optimale

Geschwindigkeit während der Annäherung an eine Ampel *im Fahrzeug* anzuzeigen. Dazu sendet die Ampelanlage ihren aktuellen Phasenzustand und eine Prognose für den nächsten Zustandswechsel an alle Fahrzeuge, die sich annähern. Der Fahrzeugcomputer setzt dann die aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit mit dem Abstand zur Ampel und der aktuellen Ampelphase in Bezug. Daraus wird errechnet, ob das Fahrzeug im Moment mit der grünen Welle „mitschwimmt“ oder ob die Geschwindigkeit außerhalb des optimalen Bereichs liegt. Abbildung 6.3 auf der nächsten Seite zeigt die Anzeige im Kombiinstrument des VW Versuchsträgers. Eine Markierung innerhalb eines Geschwindigkeitsbandes stellt den aktuellen „Abstand“ zur grünen Welle dar. Voy u. a. (1983) schlagen in einer Patentschrift zwei weitere Ausgestaltungsvarianten vor (siehe Abbildung 6.4).

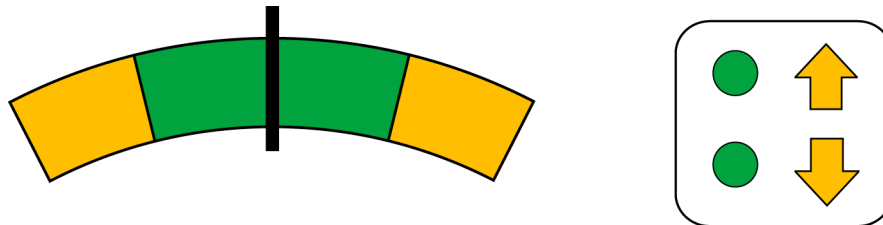
Walzer und Zimdahl (1988) stellten eine alternative Anzeige vor, die direkt in den Tacho integriert ist: Mehrere LEDs am Rand des Tachos markieren einen optimalen Geschwindigkeitsbereich. Solange sich der Fahrer in diesem Geschwindigkeitsbereich bewegt, wird er an der nächsten Ampel nicht anhalten müssen. Im Rahmen des vom Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft geförderten Projekts „Travolution“ (Audi AG, 2008) wurden in Ingolstadt mehrere Ampeln mit Kommunikationsmodulen ausgerüstet. Zwei Audi Versuchsträger sind damit in der Lage, dem Fahrer eine optimale Annäherungsgeschwindigkeit zu empfehlen. Die Darstellung erfolgt im Kombiinstrumenten-Display und im Bildschirm des fahrzeugeigenen Infotainment Systems (siehe Abbildung 6.6 auf Seite 102). Die Darstellung im Kombiinstrumenten-Display ähnelt der ursprünglich in Zimdahl (1984) vorgestellten Variante. Eliasson und Groves (1992) konzipierten bereits eine dynamische Grüne-Welle-Empfehlung im Head-up-Display (siehe Abbildung 6.8).

Eine Simulatorstudie von Duivenvoorden (2007) vergleicht eine Anzeige im Fahrzeug mit einer Anzeige am Straßenrand. Obwohl die Anzeige am Straßenrand eine höhere Akzeptanz bei den Probanden erreichte, zeigen die Ergebnisse bezüglich Ablenkung und Effizienz einen Vorteil für die Anzeige im Innenraum des Fahrzeugs. In der Studie wurde ein separates Display, das sich ungefähr auf Höhe des Kombi-Displays rechts versetzt befindet, für die Anzeige verwendet. Es ist anzunehmen, dass der Einsatz eines Head-up-Displays zu einer weiteren Reduzierung der Blickabwendung geführt hätte.

Die Kommunikation zwischen den Fahrzeugen und den Infrastruktureinrichtungen soll künftig mittels des in Arbeit befindlichen „Wireless Access in Vehicular Environment“ (WAVE) IEEE Standards 802.11p erfolgen (Jiang und Delgrossi, 2008).



**Abbildung 6.3:** Anzeige aus Zimdahl (1984) zur Empfehlung der Annäherungsgeschwindigkeit im Kombiinstrument



**Abbildung 6.4:** Anzeige aus Voy u. a. (1983) zur Anzeige des relativen „Abstands“ zur grünen Welle

#### 6.1.4 Restzeitanzeigen an Lichtsignalanlagen

Einige Länder nutzen „Countdownanzeigen“ bzw. „Restzeitanzeigen“, die an den Ampeln angebracht sind, um den Fahrern eine Information darüber zu geben, wie lange es dauert, bis die entsprechende Ampel ihren Schaltzustand ändert. Diese Zusatzanzeigen sollen den Fahrern dabei behilflich sein, ein günstiges Geschwindigkeitsprofil während der Annäherung zu wählen. Ein entsprechendes Pilotprojekt in der Hamburger City (Welt Online, 2005) (siehe Abbildung 6.9) wurde jedoch nach Abschluss der Testphase nicht weiter verfolgt (Welt Online, 2007). Es konnte lediglich eine geringe Anzahl an späten Gelb- und Rotüberfahrten vermieden werden. Gleichzeitig erhöhte sich jedoch die Zahl der Fahrer, die, angeregt durch die Restzeitanzeige, bei Rot zu früh losfuhren. Diese geringen Erfolge rechtfertigten keine Ausrüstung weiterer Ampeln. Auch Kidwai u. a. (2005) konnten keine nennenswert positiven Effekte durch die Installation von Countdown-Ampeln auf den Verkehrsdurchsatz feststellen. Das Prinzip einer Restzeitanzeige gibt es bereits seit der Erfindung der Heuer-Ampeln Mitte der 1930er Jahre (siehe Abbildung 6.9). Bei diesem Ampeltyp erfolgt die Weiterschaltung der Phasen durch einen Zeiger, der vor roten und grünen Farbbereichen angebracht ist. So ist für die Fahrer auch erkennbar, wann der nächste Wechsel der Phase erfolgen wird.

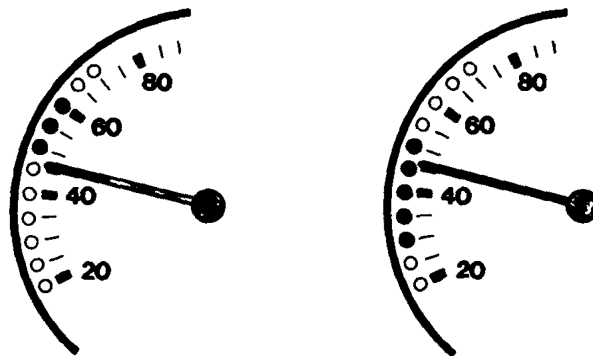


Abbildung 6.5: Anzeige aus Walzer und Zimdahl (1988) zur Empfehlung der Annäherungsgeschwindigkeit integriert in die Tachoanzeige



Abbildung 6.6: Anzeige zur Geschwindigkeitsempfehlung aus dem Projekt Travolution (Audi AG, 2008)

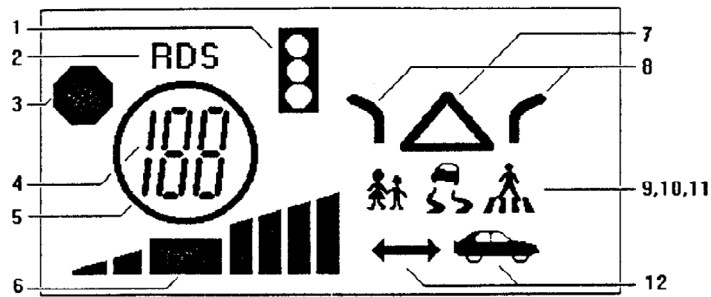


(a) Grüne-Welle-Empfehlung am Straßenrand

(b) Grüne-Welle-Empfehlung im Fahrzeug

Abbildung 6.7: Dynamische Grüne-Welle-Geschwindigkeits-Empfehlungen aus Duivenvoorden (2007)





**Abbildung 6.8:** Informationsdisplay aus Eliasson und Groves (1992) mit Anzeige für grüne Welle aktiv (1) und Geschwindigkeitsempfehlung (4)



**Abbildung 6.9:** Restzeitanzeige für Autofahrer in Hamburg (Norddeutscher Rundfunk, 2007) und Heuer-Ampel (Hochschule Ostwestfalen-Lippe, 2008)

## 6.2 Simulatorstudie zur Evaluierung verschiedener Anzeigevarianten

Alle zitierten Studien haben gemeinsam, dass die volle Kontrolle über das Geschwindigkeitsverhalten des Fahrzeugs beim Fahrer bleibt. Die verwendeten Anzeigen müssen also in der Lage sein, dem Fahrer die Empfehlung schnell und möglichst intuitiv zu vermitteln. Eine völlig autonome Anpassung der Geschwindigkeit ist zwar technisch möglich, erfordert aber ein hohes Maß an Systemzuverlässigkeit. Grundsätzlich sollten die Anzeigen in der Lage sein, dem Fahrer die folgenden Systemzustände zu vermitteln und eine passende Empfehlung bzw. Handlungsaufforderung auszusprechen:

**Konstante Weiterfahrt möglich** Behält das Fahrzeug die aktuelle Geschwindigkeit bis zu Ampel bei, wird eine Durchfahrt während der Grünphase möglich sein. Es besteht also kein weiterer Handlungsbedarf für den Fahrer.

**Anhalten bei Rot unvermeidbar** Die Ampelschaltung erlaubt es im Moment nicht, die Ampel ohne Halt zu passieren. Dies gilt unabhängig von der gewählten Annäherungsgeschwindigkeit, die sich innerhalb der zulässigen bzw. sinnvollen Grenzen bewegen

muss. Die obere Grenze ist die zulässige Höchstgeschwindigkeit nach StVO und eine untere Grenze ergibt sich aus praktischen Gründen, da eine zu langsame Annäherung an eine Ampel (z.B. < 10km/h) keine Akzeptanz finden wird.

**Passieren der Ampel ohne Stopp durch frühzeitiges Verzögern möglich** Die Ampel zeigt im Moment Rot und bei Weiterfahrt mit der aktuell gefahrenen Geschwindigkeit wird das Fahrzeug anhalten müssen. Eine frühzeitige, leichte Verzögerung während der Annäherung führt dazu, dass die Ampel während der darauffolgenden Grünphase ohne Stopp passiert werden kann.

**Passieren der Ampel ohne Stopp durch frühzeitiges Beschleunigen möglich** Die Ampel zeigt im Moment Grün. Bei Weiterfahrt mit der aktuell gefahrenen Geschwindigkeit wird die Ampel während der darauffolgenden Rotphase erreicht und der Fahrer wird anhalten müssen. Durch eine frühzeitige, leichte Beschleunigung während der Annäherung an die Ampel ist dieser Stopp jedoch vermeidbar. Eine Empfehlung muss selbstverständlich die für die Ampel geltende maximal zulässige Höchstgeschwindigkeit berücksichtigen.

Die in der Literatur beschriebenen Anzeigen für eine Ampelassistentenfunktion lassen sich in das in Tabelle 6.1 auf der nächsten Seite dargestellte Schema einordnen. Die einfachste Form, dem Fahrer eine Zusatzinformation während der Annäherung an eine Lichtsignalanlage auszusprechen, ist die Darstellung der verbleibenden Zeit in der aktuellen Ampelphase. Die Präsentation kann digital oder analog erfolgen. Ein Beispiel für eine digitale Anzeige ist ein Sekunden-Countdown in Form einer Zahl. Eine analoge Darstellung der Restzeit könnte über die Veränderung der Länge eines Balkens proportional zur verbleibenden Zeit erfolgen. Bei der Präsentation einer Restzeit muss der Fahrer selbständig die verschiedenen Handlungsaufforderungen ableiten. Er muss also beispielsweise erkennen, dass die Ampel in wenigen Sekunden auf Rot umschaltet und unter Berücksichtigung des Abstandes zur Ampel sowie der aktuellen Fahrgeschwindigkeit entscheiden, ob ein Passieren bei Grün noch möglich sein wird.

Dem gegenüber stehen Anzeigevarianten, die dem Fahrer die Berechnung einer optimalen Annäherungsgeschwindigkeit abnehmen. Das System präsentiert während der Annäherung eine Geschwindigkeitsempfehlung. Diese Empfehlung hängt allerdings - anders als die Restzeit - von der Fahrgeschwindigkeit und dem Abstand zur Ampel ab. Angenommen, die Empfehlungsgeschwindigkeit  $v_{Empfehlung}$  wird zum Zeitpunkt  $t_1$  ausgesprochen, der Abstand zur Ampel beträgt  $s_{Abstand}$  und die Ampel schaltet zu einem Zeitpunkt  $t_2$  mit  $t_2 > t_1$  von Grün auf Rot, dann gilt im einfachsten Fall:

$$v_{Empfehlung} = \frac{s_{Abstand}}{t_2 - t_1}$$

Letztendlich muss der Fahrer die Geschwindigkeit des eigenen Fahrzeugs auf mindestens  $v_{Empfehlung}$  einstellen, um die entsprechende Ampel noch während der Grünphase passieren zu können. Dadurch entsteht für den Fahrer eine zusätzliche Regelaufgabe. Hier kann nach

	Restzeit	Geschwindigkeit...	
		...als Kompensationsaufgabe	...als Folgeaufgabe
<b>Analog</b>	<i>Analoge</i> Darstellung der verbleibenden Zeit bis zum Umschalten der Ampel.	<i>Analoge</i> Darstellung der Differenzgeschwindigkeit zwischen optimaler und aktueller Fahrgeschwindigkeit.	<i>Analoge</i> Darstellung der aktuellen Fahrgeschwindigkeit sowie separate <i>analoge</i> Darstellung der optimalen Annäherungsgeschwindigkeit.
<b>Digital</b>	<i>Digitale</i> Darstellung der verbleibenden Zeit bis zum Umschalten der Ampel.	<i>Digitale</i> Darstellung der Differenzgeschwindigkeit zwischen optimaler und aktueller Fahrgeschwindigkeit.	<i>Digitale</i> Darstellung der aktuellen Fahrgeschwindigkeit sowie separate <i>digitale</i> Darstellung der optimalen Annäherungsgeschwindigkeit.

**Tabelle 6.1:** Mögliche Varianten zur Präsentation einer Zusatzinformation während der Annäherung an eine Lichtsignalanlage

Bubb (1993) zwischen einer Kompensationsaufgabe und einer Folgeaufgabe unterschieden werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit die Information entweder digital oder analog darzustellen. Dies wird durch die vier Felder in Tabelle 6.1 verdeutlicht. Bei einer Kompensationsaufgabe wird dem Fahrer lediglich der Unterschied zwischen der aktuellen Fahrgeschwindigkeit und der optimalen Annäherungsgeschwindigkeit präsentiert. Diese Art der Darstellung (analoge Kompensationsaufgabe) wurde beispielsweise im Projekt Travolution umgesetzt (siehe Abbildung 6.6 auf Seite 102 links). Ein Beispiel für eine analoge Folgeaufgabe liefern Walzer und Zimdahl (1988) (siehe Abbildung 6.5 auf Seite 102). Hier werden die Fahrgeschwindigkeit und die Geschwindigkeitsempfehlung getrennt angezeigt.

### 6.2.1 Untersuchte Anzeigevarianten

Im Rahmen dieser Arbeit wurden in Anlehnung an die genannten Literaturstellen drei repräsentative Anzeigevarianten für eine Empfehlung innerhalb des Fahrzeugs umgesetzt und bezüglich unterschiedlicher Kriterien in einer Simulatorstudie verglichen<sup>1</sup>.

**Countdown** Dem Fahrer wird eine Information in Form eines Sekunden-Countdowns präsentiert (z.B. Sekunden bis zum Umschalten der Ampel von Rot auf Grün). Der Fahrer kann die Zeitinformation mit dem Restweg zur Ampel in Bezug setzen und dann eine Entscheidung daraus ableiten (z.B. ob die Ampel noch während der Grünphase erreichbar ist oder ob bereits früher abgebremst werden sollte).

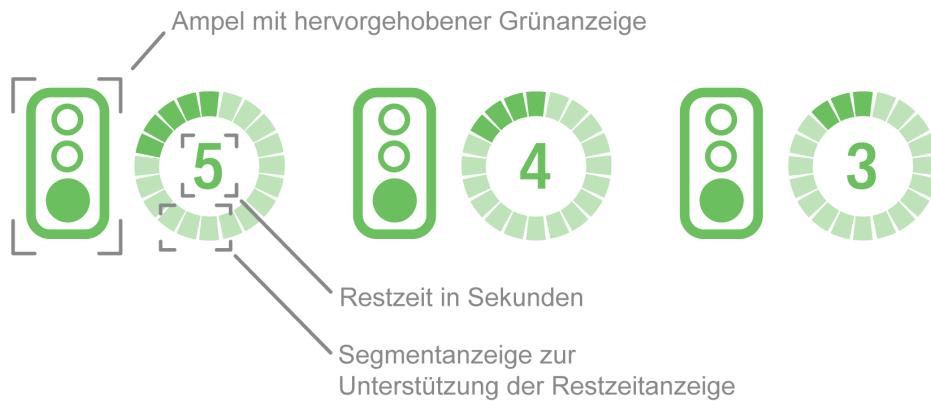
Abbildung 6.10 auf Seite 107 zeigt den Entwurf für die Countdown-Anzeige. Dargestellt ist lediglich der Fall für die verbleibenden Sekunden in der Grünphase. Auf welche Ampelphase sich der Countdown bezieht kann der Fahrer aus der verwendeten Farbe der gesamten Anzeige ableiten. Als zusätzliches Unterscheidungsmerkmal dient

<sup>1</sup>Veröffentlicht unter Thoma u. a., 2007 und Thoma u. a., 2008a

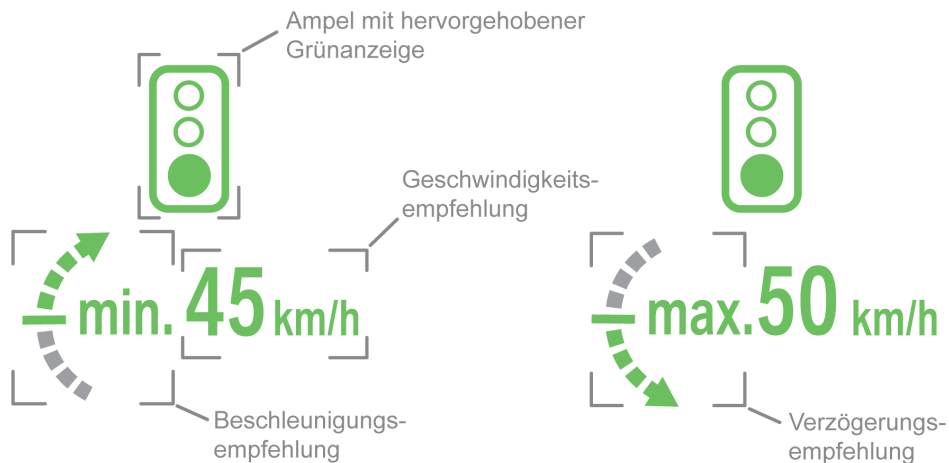
eine Hervorhebung der entsprechenden Leuchte in einem schematischen Ampelsymbol. Dies ist vor allem für Personen mit Rot-Grün-Sehschwäche von Bedeutung. Zur Unterstützung der Ablesbarkeit der Restzeit dient eine analoge Segmentanzeige. Die Anzahl der beleuchteten Segmente entspricht der Anzahl der verbleibenden Sekunden.

**Minimal-/Maximal-Geschwindigkeit** Bei dieser Anzeigevariante wird dem Fahrer während der Annäherung an eine Ampel eine Geschwindigkeitsempfehlung in Form einer Minimal- oder einer Maximal-Geschwindigkeit präsentiert. Die Angabe einer Minimal-Geschwindigkeit bedeutet dabei, dass die im Moment Grün zeigende Ampel nur bei Grün passiert werden kann, wenn auf die Minimal-Geschwindigkeit beschleunigt wird. Im Falle einer Maximal-Geschwindigkeitsempfehlung muss der Fahrer verzögern, damit die im Moment Rot zeigende Ampel ohne Anzuhalten bei Grün passiert werden kann. Abbildung 6.11 auf der nächsten Seite zeigt die zwei verschiedenen Ausprägungen. Die Anzeige enthält zusätzlich zur Geschwindigkeit einen Hinweis, ob es sich um eine minimal oder eine maximal zu fahrende Geschwindigkeit handelt. Da sich die beiden verwendeten Wortabkürzungen „min.“ und „max.“ optisch nur leicht voneinander unterscheiden, wurde zusätzlich ein stilisierter Tachoausschnitt eingeführt, der die entsprechende Handlungsaufforderung unterstreicht. Darüber hinaus können zwei weitere Anzeigefälle auftreten: Muss vor der roten Ampel in jedem Fall angehalten werden, so wird lediglich ein rotes Ampelsymbol eingeblendet. Kann die aktuell gefahrene Geschwindigkeit beibehalten werden, so wird ein grünes Ampelsymbol dargestellt.

**Tachoanzeige** Die in der Minimal-/Maximal-Geschwindigkeitsanzeige beschriebenen Zustände werden hier über eine analoge Anzeige direkt im Tachometer des Fahrzeugs realisiert. Abbildung 6.12 auf Seite 108 zeigt einen Anwendungsfall der Anzeige. Ein Vorteil dieser Darstellungsvariante liegt in der Fähigkeit, nicht nur Grenz-Geschwindigkeiten, sondern vielmehr Geschwindigkeits-Zielbereiche anzeigen zu können. Dies kommt dem eigentlichen Anwendungsfall näher, da es nicht eine optimale Geschwindigkeit gibt, sondern einen größeren Bereich, in dem sich die Fahrzeuggeschwindigkeit bewegen kann. Darüber hinaus ist bei dieser Anzeige intuitiv erkennbar, welche Handlungsaufforderung an den Fahrer gerichtet wird. Befindet sich die Tachonadel in einem roten Bereich, kann durch Beschleunigen oder Verzögern in Richtung des grünen Bereichs ein Anhalten vor der Ampel vermieden werden. Abbildung 6.13 auf Seite 109 stellt die beiden Anzeigevarianten Minimal-/Maximal-Geschwindigkeitsanzeige und Tachoanzeige entsprechend der verschiedenen Anwendungsfälle gegenüber. Bei der Tachoanzeige sind die Fälle „Anhalten in jedem Fall erforderlich“ und „keine Geschwindigkeitsänderung notwendig“ durch einen vollständig roten bzw. grünen Bereich konsistent darstellbar. Zur Rückmeldung, in welchem Zustand sich die Ampel bei Erreichen unter Berücksichtigung der aktuellen Fahrgeschwindigkeit befinden wird, dient ein zusätzliches Ampelsymbol im unteren Bereich des Tachos. Auch hier ist wieder die entsprechende Leuchte durch ihre Größe hervorgehoben, um einen zusätzlichen An-



**Abbildung 6.10:** Entwurf der Countdownanzeige für die Restzeit in der Grünphase



**Abbildung 6.11:** Entwurf der digitalen Minimal-/Maximalempfehlung

haltspunkt für Personen mit Rot-Grün-Sehschwäche zu erreichen.

## 6.2.2 Versuchsbeschreibung

Mit Hilfe eines Probandenversuchs soll untersucht werden, welche der drei beschriebenen Anzeigevarianten für den Einsatz in einem Fahrzeug am besten geeignet ist. Der Versuch wurde in einem Fahr Simulator durchgeführt, da in einer realen Verkehrsumgebung die Bedingungen für einen Fahrversuch aus folgenden Gründen nicht ausreichend kontrollierbar sind:

- Die Ampelschaltungen lassen sich nicht beeinflussen, sodass die bewusste Herbeiführung einer gewünschten Konstellation nicht möglich ist.

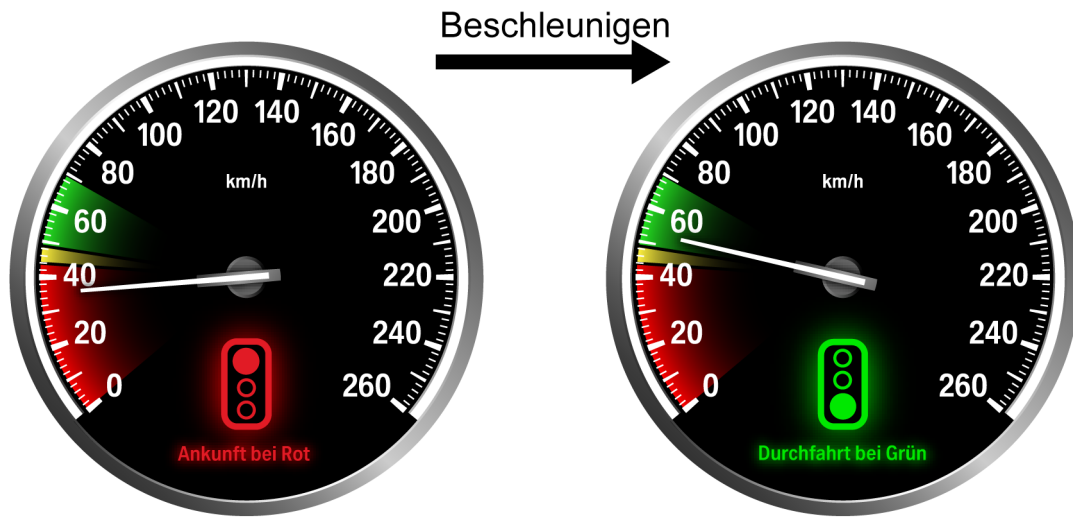


Abbildung 6.12: Entwurf der analogen Bereichsanzeige im Tacho

- Andere Verkehrsteilnehmer beeinflussen das Verhalten des Probanden und sind damit ebenfalls eine Störgröße.
- Die Streckenführung muss sich an die örtlichen Gegebenheiten anpassen und erlaubt deshalb keine flexible Gestaltung des Versuchsablaufs.
- Da es sich um Systeme handelt, welche die Ausübung der primären Fahraufgabe beeinflussen sollen, bietet ein Simulator eine Umgebung um die Tauglichkeit ohne Risiko für den Probanden zu untersuchen.

### 6.2.3 Vergleichskriterien

Die drei Varianten wurden bezüglich der folgenden vier Kriterien verglichen:

**Verständlichkeit im Erstkontakt** Wie für jedes Anzeigekonzept gilt, dass der Fahrer die Bedeutung der Anzeige ohne Zuhilfenahme einer Anleitung verstehen können sollte. Vor allem die Frage, ob der Benutzer die dargestellte Information korrekt mit der Umgebung assoziiert (in diesem Fall mit einer Lichtsignalanlage) ist hier von Bedeutung. Darüber hinaus stellen vor allem die Varianten „Minimal-/Maximal-Geschwindigkeit“ und „Tachoanzeige“ hohe Anforderungen an die Fähigkeit des Fahrers, die verschiedenen Anwendungsfälle bzw. Handlungsaufforderungen zu unterscheiden. Die Tatsache, dass abweichend vom aktuellen Zustand der Ampel eine Prognose über den zukünftigen Zustand vermittelt werden soll, erschwert das Verständnis weiter. Denn obwohl die Ampel in der Realität beispielsweise gerade Rot zeigt, muss das System dem Fahrer vermitteln, dass die Ampel unter bestimmten Voraussetzungen im weiteren Verlauf auf Grün umschalten wird.


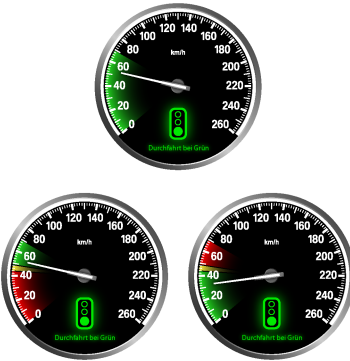






	Minimal-/Maximal-Geschwindigkeitsanzeige	Kombiinstrumenten-Anzeige
Durchfahrt bei Grün ohne Geschwindigkeitsänderung möglich		
Anhalten bei Rot unvermeidbar		
Durchfahrt bei Grün durch Beschleunigen möglich		
Durchfahrt bei Grün durch Verzögern möglich		

Abbildung 6.13: Systemzustände der Anzeigevarianten „Minimal-/Maximal-Geschwindigkeit“ und „Kombiinstrumentendisplay“

**Akzeptanz** Die Verständlichkeit einer Anzeige alleine ist nicht ausreichend, um dem Fahrer einen Mehrwert zu bieten. Die Art und Weise der Präsentation muss ihn auch ansprechen und er muss die Bereitschaft haben diese zu nutzen.

**Effektivität** Ein Ziel bei der Entwicklung eines solchen Assistenzsystems ist es, den Kraftstoffverbrauch für die Durchfahrt einer Kreuzung mit Lichtsignalanlage zu minimieren. Es ist anzunehmen, dass unterschiedliche Arten der Darstellung Einfluss auf die Effektivität des Systems haben. Je besser eine Anzeige das Fahrverhalten in Richtung Idealverlauf beeinflusst, desto höher ist die Effektivität des Systems.

**Ablenkungspotenzial** Da das Durchfahren eines Kreuzungsbereichs ohnehin eine stark visuell belastende Aufgabe darstellt und die Aufmerksamkeit des Fahrers nach Möglichkeit außerhalb des Fahrzeugs liegen sollte, birgt die visuelle Präsentation zusätzlicher Anzeigen im Fahrzeuginneren ein Ablenkungsrisiko. Deshalb sollten die Anzahl und die Dauer der Blicke, die nötig sind, um die Anzeige zu interpretieren und in entsprechende Handlungen umzusetzen, minimal sein.

## 6.2.4 Versuchsplan

### Unabhängige Variablen

**Faktor „HMI Typ“** Der Faktor HMI-Typ repräsentiert die unterschiedlichen Anzeigevarianten und umfasst *vier* Stufen: „Countdown“, „Tacho“, „Min/Max“ und eine Baseline-Messung ohne Anzeige.

**Faktor „Szenario“** Der Faktor Szenario soll die Wirkung der Anzeigen unter verschiedenen Ampelschaltungen ermitteln. Grundlage für die verschiedenen Ampelszenarien waren die in Kapitel 6.2 auf Seite 103 genannten Anwendungsfälle, die ein Assistenzsystem unterstützen sollte. Voruntersuchungen haben gezeigt, dass eine Empfehlung von maximal 15 km/h über oder unter der aktuell gefahrenen Geschwindigkeit praktikabel ist. Zusätzlich wurden Empfehlungen von 5 km/h über oder unter der aktuell gefahrenen Geschwindigkeit eingeführt. Damit ergeben sich sechs Faktorstufen:

**Immer Grün** Die Ampel kann ohne Veränderung der aktuell gefahrenen Geschwindigkeit bei Grün passiert werden.

**Immer Rot** Die Ampel kann unter keinen Umständen während der Grünphase passiert werden. Ein Halten vor der Ampel ist unvermeidbar.

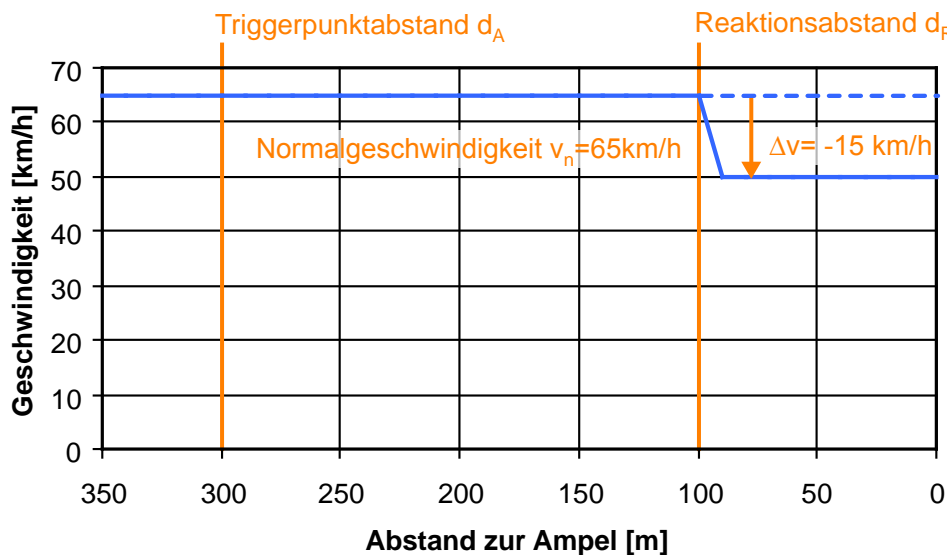
**+15 km/h** Die Ampel kann noch in der *aktuellen* Grünphase passiert werden, wenn die aktuell gefahrene Geschwindigkeit um 15 km/h erhöht wird.  
(Minimal-Geschwindigkeit)

**+5 km/h** Die Ampel kann noch in der *aktuellen* Grünphase passiert werden, wenn die aktuell gefahrene Geschwindigkeit um 5 km/h erhöht wird.  
(Minimal-Geschwindigkeit)



- 15 km/h Die Ampel kann während der *nächsten* Grünphase passiert werden, wenn die aktuell gefahrene Geschwindigkeit um 15 km/h verringert wird.  
(Maximal-Geschwindigkeit)
- 5 km/h Die Ampel kann während der *nächsten* Grünphase passiert werden, wenn die aktuell gefahrene Geschwindigkeit um 5 km/h verringert wird.  
(Maximal-Geschwindigkeit)

Diese Faktorstufen sind jeweils repräsentativ für die Anwendungsfälle, die im realen Straßenverkehr auftreten können. Da es sich um eine unabhängige Variable handelt, müssen die verschiedenen Szenarien im Fahrsimulationsversuch kontrolliert erzeugt werden. Gleichzeitig sind jedoch die Varianzen durch unterschiedliche Fahrstile zu minimieren. Dies geschieht durch gezielte Anpassung der Schaltung der jeweils nächsten Ampel im Simulationskurs. Die Anpassung erfolgt immer bei einem bestimmten Abstand zwischen Ampel und Simulationsfahrzeug. Abbildung 6.14 verdeutlicht die Zusammenhänge.



**Abbildung 6.14:** Schematische Darstellung zur Berechnung der Ampelschaltung für ein Beispielszenario

Ausgehend von einer Normalgeschwindigkeit — welche nach Vorversuchen auf 65 km/h festgelegt wurde — soll dem Probanden je nach Szenario eine Beschleunigungs- oder Verzögerungsempfehlung angezeigt werden. In der Abbildung ist exemplarisch der Fall „-15 km/h“ aufgezeigt. Erreicht das Simulationsfahrzeug einen Triggerpunkt  $d_t$  zur Kreuzung, muss das Schaltprogramm der Ampel zum Szenario passend gesetzt werden. Insbesondere die verbleibende Zeit in der aktuellen Ampelphase ist dabei von Bedeutung. Dieser Triggerpunkt ist so gewählt, dass die Ampel für den Probanden noch nicht sichtbar ist. Denn durch die Anpassung können unter Umständen ungültige Sprünge im Schaltprogramm auftreten (beispielsweise direkter Übergang

von Grün auf Rot). Nach dem Passieren dieses Triggerpunkts kann keine Anpassung des Schaltprogramms der Ampel mehr erfolgen, da dies die Vorhersagen des Ampelassistentensystems beeinflussen würde. Zusätzlich wird die Annahme getroffen, dass der Proband nach der Präsentation der Anzeige in einem gewissen Reaktionsabstand zur Ampel  $d_r$  auf die Anzeigen reagiert. Im Beispiel „-15 km/h“ ist die Restdauer der Rotphase so zu wählen, dass der Proband die Ampel genau in dem Moment erreicht, wenn diese von Rot auf Grün umschaltet, wenn er die Geschwindigkeit der Empfehlung des Assistenzsystems anpasst. Die zur Erzeugung des gewünschten Szenarios notwendige Restdauer der Ampelphase lässt sich unter den getroffenen Annahmen folgendermaßen abschätzen:

$$t_{rest} = \frac{d_t - d_r}{v_n} + \frac{d_r}{v_n - \Delta v}$$

Die Annahme ist also, dass der Proband die Strecke vom Triggerpunkt bis zum Reaktionsabstand unverändert mit  $v_n$  fährt und dann näherungsweise der Handlungsaufforderung schlagartig Folge leistet und mit der Geschwindigkeit  $v_n - \Delta v$  weiterfährt. In der Realität wird sich natürlich ein „glatter“ Geschwindigkeitsverlauf ergeben, aber als erste Näherung für das Fahrerverhalten ist diese Abschätzung ausreichend.

**Faktor „Wiederholung“** Es ist davon auszugehen, dass durch mehrfache Nutzung der Anzeige ein Lerneffekt auftritt. Deshalb durchfährt jeder Proband jedes Szenario mit jeder Anzeigevariante zweimal. Es gibt also die zwei Faktorstufen „erste Durchfahrt“ und „zweite Durchfahrt“.

### Abhängige Variablen

**Erstkontakt: Kurzinterview** Die Probanden führen ohne vorhergehende Erklärung eine kurze Fahrt im Simulator durch und erleben dabei eines der drei Anzeigekonzepte. Der Versuchsleiter klärt dann in einem kurzen Gespräch nach der Fahrt, ob die Anzeige „sofort verstanden“, „später während der Fahrt verstanden“ oder „nicht verstanden“ wurde.

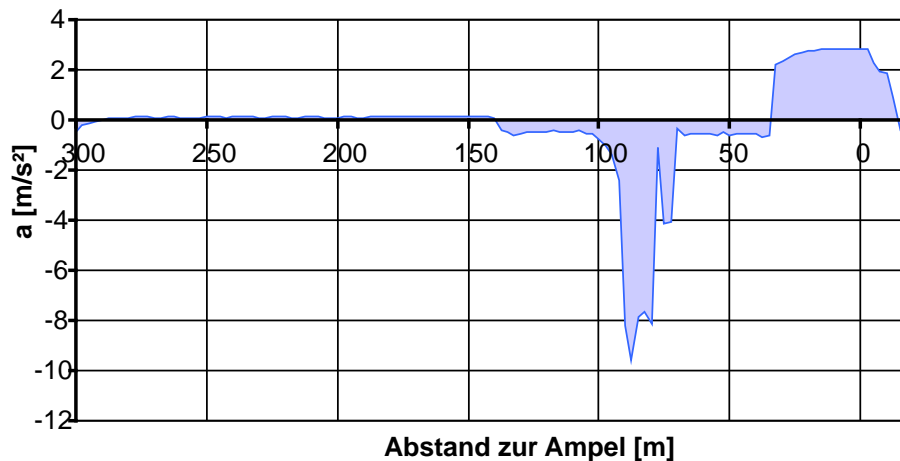
**Akzeptanz: Fragebogen** Zur Charakterisierung der Stichprobe wurden zunächst einige demographische Daten wie Alter, Geschlecht oder Fahrgewohnheiten abgefragt (Anhang C.1.1). Die Beurteilung jeder einzelnen Anzeigevariante erfolgte dann durch die Bewertung verschiedener Aussagen auf einer 5-Punkt Likert Skala. Schwerpunkte bei der Beurteilung durch die Probanden waren die Verständlichkeit der Anzeigen, die Umsetzbarkeit der Handlungsaufforderung in der jeweiligen Fahrsituation und die mögliche Erzeugung eines Zeitdruckgefühls bei den Fahrern (Anhang C.1.2). Zusätzlich hatten die Probanden am Ende der Untersuchung die Möglichkeit, die drei Anzeigevarianten einem direkten Vergleich zu unterziehen (Anhang C.1.1).

**Effektivität: Beschleunigungsintegral** Da ein Ziel des Ampelassistenten die Reduktion des Kraftstoffverbrauchs während einer Kreuzungsüberfahrt ist, ist es naheliegend, den

theoretischen Benzinverbrauch der Simulationsfahrzeugs zu bestimmen und für verschiedene Anzeigevarianten zu vergleichen. Da im BMW Fahrsimulator zum Zeitpunkt der Untersuchung kein geeignetes Verbrauchsmodell existierte, diente das Integral des Betrags der Beschleunigung als abstrakter Vergleichswert. Obwohl dieser Wert Sachverhalte wie beispielsweise das Motorkennfeld oder den Zustand der Fahrzeugaggregate vernachlässigt, korreliert er hoch mit dem Kraftstoffverbrauch und ist darüber hinaus ein Maß für den Fahrkomfort. Die Messgröße ist folgendermaßen definiert:

$$I = \int_a^b |a(t)| dt$$

Die Werte werden im Bereich zwischen 300 Meter vor der Ampel bis 50 Meter hinter der Ampel integriert. Die entsprechenden Zeitwerte sind  $a$  und  $b$  (es wird über die Zeit integriert). Abbildung 6.15 zeigt exemplarisch einen Beschleunigungsverlauf einer Ampeldurchfahrt.



**Abbildung 6.15:** Beispiel für den Verlauf der Beschleunigung während einer Ampeldurchfahrt

Zunächst verzögert der Proband stark, da die Ampel im Moment Rot zeigt. Dann schaltet die Ampel auf Grün und das Fahrzeug beschleunigt wieder. Im Idealfall ist der Integralwert null, da dann keine Verzögerungen oder Beschleunigungen während der Durchfahrt auftreten.

**Ablenkungspotenzial: Blickdauer und -anzahl** Um abschätzen zu können, wie stark die jeweiligen Anzeigen von der Fahraufgabe ablenken, wurde ein Blickerfassungssystem eingesetzt (SensoMotoric Instruments GmbH, 2004). Das System besteht aus einer Kamera, welche mittig über dem Lenkrad montiert wird, sowie drei Infrarotscheinwerfern (siehe Abbildung 6.16 auf der nächsten Seite). Zur Bestimmung der Kopfposition nutzt das System ein Kopfband, auf welchem geeignete Marker angebracht sind. Die Software erlaubt es, bestimmte Areas of Interest (AOIs) im Umfeld des Probanden festzulegen

und anschließend die Anzahl und Dauer der Blicke in die jeweiligen AOIs automatisiert auszuwerten.



**Abbildung 6.16:** SMI Eyetracking System mit Kamera, Infrarotscheinwerfern und Kopfband

### **6.2.5 Streckenführung und Versuchsablauf**

Für diese Untersuchung wurde ein einfach aufgebauter Simulationskurs gewählt, der eine Fahrt ohne Abbiegemanöver erlaubt und in dem in ausreichendem Umfang durch Lichtsignale geregelte Kreuzungen vorhanden sind. In Abbildung 6.17 sind die ovalförmige Streckenführung hervorgehoben und die Kreuzungspunkte gekennzeichnet (K1-K6). Frühere Untersuchungen haben gezeigt, dass Abbiegemanöver für die Probanden eine Zusatzbelastung darstellen. Da eine Geschwindigkeitsempfehlung bei einem Abbiegemanöver an einer Kreuzung ohnehin nur eine untergeordnete Rolle spielt, verzichtet dieser Versuch auf derartige Situationen. Die in Abschnitt 6.2.4 bereits ausführlich erklärten Szenarien wurden nach Tabelle 6.2 jeweils einer Kreuzung im Simulationskurs zugeordnet. Diese Zuordnung ist während des Versuchs aus technischen Gründen nicht veränderbar. Um dennoch eine möglichst gute Randomisierung der Reihenfolge der verschiedenen Szenarien zu erreichen, starteten die Probanden von verschiedenen Positionen im Kurs (im Uhrzeigersinn UZ1-UZ6 und gegen den Uhrzeigersinn GUZ1-GUZ6).

Es ist leicht einsehbar, dass der umgebende Verkehr einen großen Einfluss auf die Effektivität eines Ampelassistenzsystems hat. Geschwindigkeitsempfehlungen sind nur dann hilfreich, wenn der vorausfahrende Verkehr eine entsprechende Fahrweise erlaubt. In Dorner (2003) wird das Auftreten dieser Problematik während der Durchführung eines Straßenexperiments zur Effizienzbestimmung von Geschwindigkeitsvorgaben an Lichtsignalanlagen bestätigt. Um zumindest sinnlose Empfehlungen an den Fahrer zu vermeiden, könnten die Messungen eines Radar-Sensors im Fahrzeug mit in die Berechnung einer optimalen Annäherungsgeschwindigkeit eingehen. Ein solcher Sensor wird auch für eine aktive Geschwindigkeitsregelung benötigt und könnte für diesen Anwendungsfall mit verwendet werden. Da in diesem Experiment verschiedene Anzeigevarianten miteinander verglichen werden sollen, stellt der umgebende Verkehr eine Störgröße dar, die zu einer stärkeren Streuung der Daten

und damit zu einer Nicht-Entdeckung von Effekten führen kann. Deshalb verzichtet dieses Experiment auf Verkehr, der das Fahrverhalten der Probanden beeinflussen könnte.

Abbildung 6.18 auf Seite 117 zeigt den zeitlichen Ablauf des Versuchs. Die Probanden füllten zunächst den demographischen Teil des Fragebogens aus ❶ (Anhang C.1.1) um sich anschließend im Rahmen einer Eingewöhnungsfahrt mit der Sitzkiste und dem Simulator vertraut zu machen ❷. Da es sich um einen statischen Simulator handelt, sollten die Probanden vor allem Zielbremsungen vor Kreuzungen bzw. Ampeln trainieren, da die fehlende Haptik diese Fahrmanöver erschwert. Anschließend durchfuhren die Probanden drei bis vier Ampelkreuzungen und erhielten dabei eine der drei Anzeigevarianten zur Unterstützung ❸. Der Versuchsleiter prüfte dann durch gezielte Fragen das Verständnis ab ❹. Der Hauptteil des Versuchs ❺ besteht aus vier Fahrten von jeweils mindestens zwölf Ampeldurchfahrten. Die Reihenfolge der Blöcke wurde dabei randomisiert permutiert. Jeweils nach den drei Fahrten mit Anzeige füllten die Probanden einen Fragebogen zur Beurteilung eines einzelnen Systems aus (Anhang C.1.2). Nach Absolvierung aller vier Vergleichsfahrten fand eine abschließende vergleichende Bewertung der drei Anzeigevarianten statt ❻ (Anhang C.1.3).

### 6.2.6 Technische Umsetzung und Simulatoraufbau

Der Versuch wurde in einem statischen Simulator der BMW Group durchgeführt. Dieser besteht aus fünf Projektionsleinwänden, die jeweils 2,7 Meter breit und 2,8 Meter hoch sind (siehe Abbildung 6.19 auf Seite 118). So wird ein Sichtfeld von etwa 240° erzeugt.

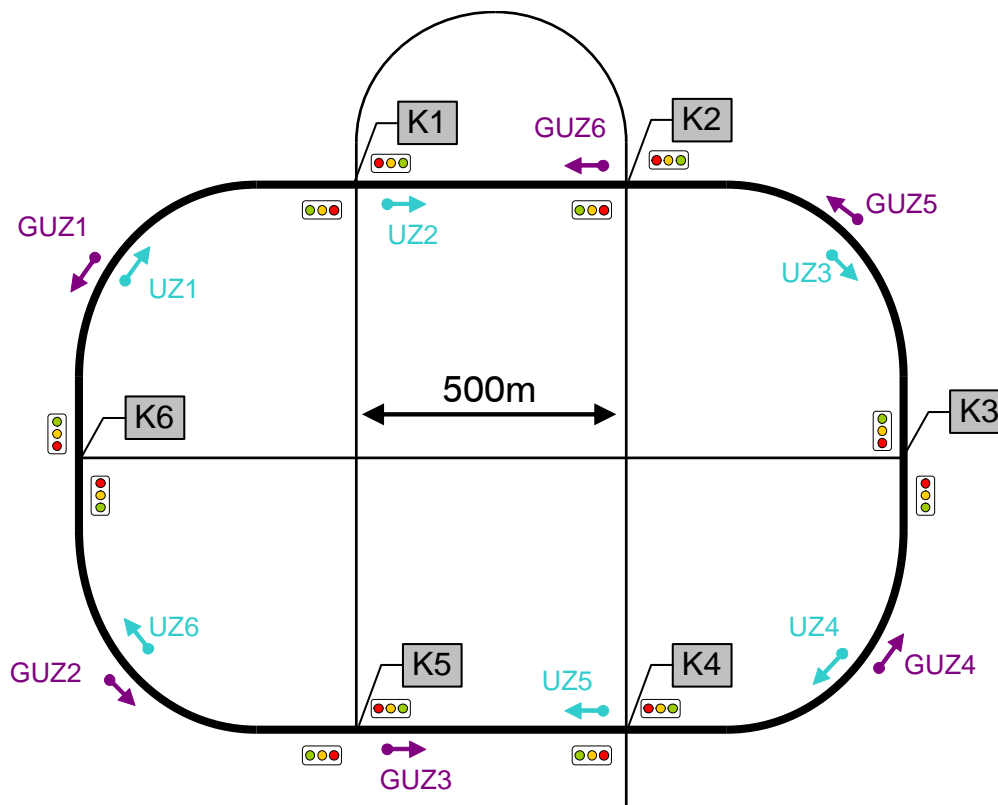
Die verwendete Sitzkiste war mit einem frei programmierbaren Kombiinstrumenten-Display ausgestattet. Auch wenn die Anzeigevarianten „Countdown“ und „Min/Max“ für eine Darstellung im Headup-Display geeignet sind, wurden diese im Kombi-Display präsentiert. So ist ausgeschlossen, dass die unterschiedlichen Anzeigeorte Einfluss auf die Blickabwendungszeiten während des Versuchs haben (siehe Abbildung 6.20 auf Seite 118).

### 6.2.7 Stichprobe

27 Personen, davon 23 Männer und 4 Frauen nahmen am Experiment teil. Das mittlere Alter betrug 29 Jahre (Standardabweichung 6,0 Jahre, Minimum 24, Maximum 41 Jahre). 6 Probanden hatten bereits Erfahrung im Fahr Simulator. Aufgrund technischer Einschränkungen des Blickerfassungssystems wurden keine Brillenträger zum Experiment eingeladen. Darüber hinaus stellte das Vorhandensein einer Farbschwäche ein Ausschlusskriterium dar.

Kreuzung	Szenario	$\Delta v$
K1	Durchfahrt bei grün ohne Geschwindigkeitsveränderung möglich	--
K2	Durchfahrt bei grün durch leichtes Beschleunigen möglich	5
K3	Anhalten bei Rot in jedem Fall erforderlich	--
K4	Durchfahrt bei Grün durch etwas stärkeres Verzögern möglich	-15
K5	Durchfahrt bei Grün durch etwas stärkeres Beschleunigen möglich	15
K6	Durchfahrt bei Grün durch leichtes Verzögern möglich	-5

**Tabelle 6.2:** Zuordnung der Situationen zu den einzelnen Kreuzungen des Simulationskurs



**Abbildung 6.17:** Schematische Darstellung des Fahrplans mit Startpunkten im Uhrzeigersinn (UZ1-UZ6) und gegen den Uhrzeigersinn (GUZ1-GUZ6) sowie Ampelkreuzungen (K1-K6)



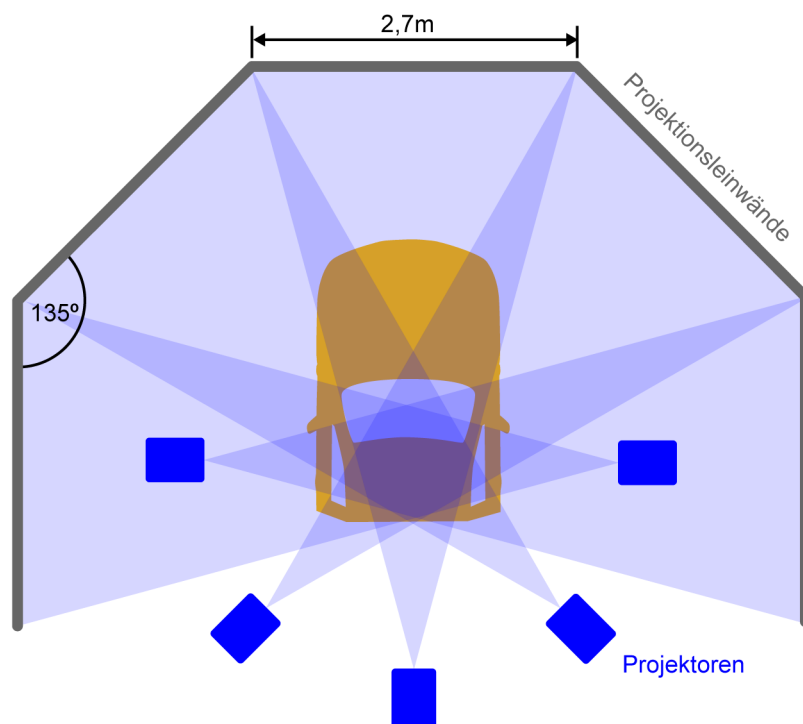


Abbildung 6.19: Aufbau des statischen Simulators

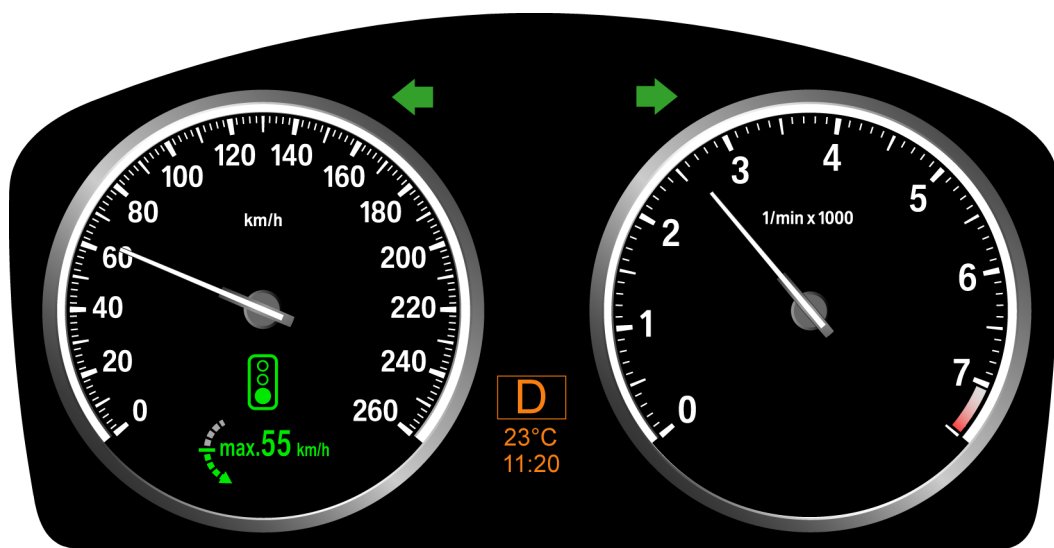


Abbildung 6.20: Kombiinstrument in der Sitzkiste mit Min-/Max-Anzeige



### Akzeptanz

Da die Daten im Falle der Fragebögen ordinal-skaliert sind, darf keine Mittelwertbildung erfolgen. Abbildung 6.21 auf der nächsten Seite zeigt deshalb die Anzahl der zustimmenden Antworten („trifft eher zu“ und „trifft voll zu“) für die Fragebogen-Aussagen und jedes System. Es fällt auf, dass die Variante „Tacho“ in nahezu allen Fragestellungen besser als die anderen beiden Varianten abschneidet (bei den Fragestellungen zur Ablenkung, zum Zeitdruck und zum Störpotenzial ist eine geringe Anzahl zustimmender Antworten als positiv zu werten). Zwischen den Varianten „Min-/Max“ und „Countdown“ lässt sich aufgrund der Fragebogenauswertung keine eindeutige Rangfolge bilden. Auf Signifikanztests wurde bei dieser Auswertung verzichtet.

### Effektivität

Abbildung 6.22 auf Seite 121 zeigt beispielhaft für das Szenario „-15 km/h“ die Geschwindigkeitsverläufe in Abhängigkeit vom Abstand zur Ampel für alle Probanden und alle Durchfahrten für die Baseline und die Anzeigevariante „Tacho“. Zusätzlich sind zur besseren Interpretierbarkeit der Mittelwertverlauf und die entsprechenden Standardabweichungen ange tragen. Die Probanden nähern sich in diesem Szenario einer roten Ampel an, die dann kurz bevor das Simulationsfahrzeug die Ampel erreicht auf Grün umschaltet. Während einer Fahrt ohne Zusatzanzeige verzögern die Probanden im Mittel auf 20 km/h und beschleunigen dann wieder auf 60 km/h. Dadurch entsteht ein „Knick“ im Geschwindigkeitsprofil. Stellt man einen Vergleich zu den Fahrten mit Anzeige her, so lässt sich qualitativ feststellen, dass die Anzeigevariante einen Einfluss auf das Fahrverhalten hat. Es wird etwas früher leicht verzögert und die minimale Geschwindigkeit liegt im Mittel nie unter 40 km/h. Die Glättung des Geschwindigkeitsverlaufs wirkt sich sowohl positiv auf den Fahrkomfort (weniger starke Verzögerungen notwendig) als auch auf den Kraftstoffverbrauch aus (nach der Ampel muss weniger stark beschleunigt werden).

Um einen Vergleich aller Anzeigevarianten unter allen Bedingungen durchzuführen, wird das in Abschnitt 6.2.4 eingeführte Geschwindigkeitsintegral gebildet. Abbildung 6.23 zeigt den Mittelwert der Integrale für alle Systeme sowie der Baseline-Fahrt unter den jeweiligen Szenarien. Wie zu erwarten war, erzeugt das Szenario „immer Grün“ sehr kleine Werte, denn die Probanden müssen in dieser Situation ihre aktuelle Geschwindigkeit nicht anpassen. Im Szenario „immer Rot“ hingegen entstehen die größten Werte. Die Probanden müssen hier zunächst von gut 60 km/h in den Stand verzögern und beschleunigen dann wieder auf 60 km/h nach der Ampel (das Integral wird von 300 Meter vor bis 50 Meter nach der Ampel gebildet). So kommen für das Integral Werte von etwas mehr als 120 km/h im Mittel zustande. Die Werte unter den anderen Szenarien liegen prinzipbedingt zwischen diesen beiden Extremwerten.

Eine univariate Varianzanalyse mit Messwiederholung zeigt einen hochsignifikanten Effekt für die Faktoren „Anzeigetyp“ ( $F(3,54) = 10.02, p < 0,001$ ) und „Szenario“ ( $F(5,90) =$

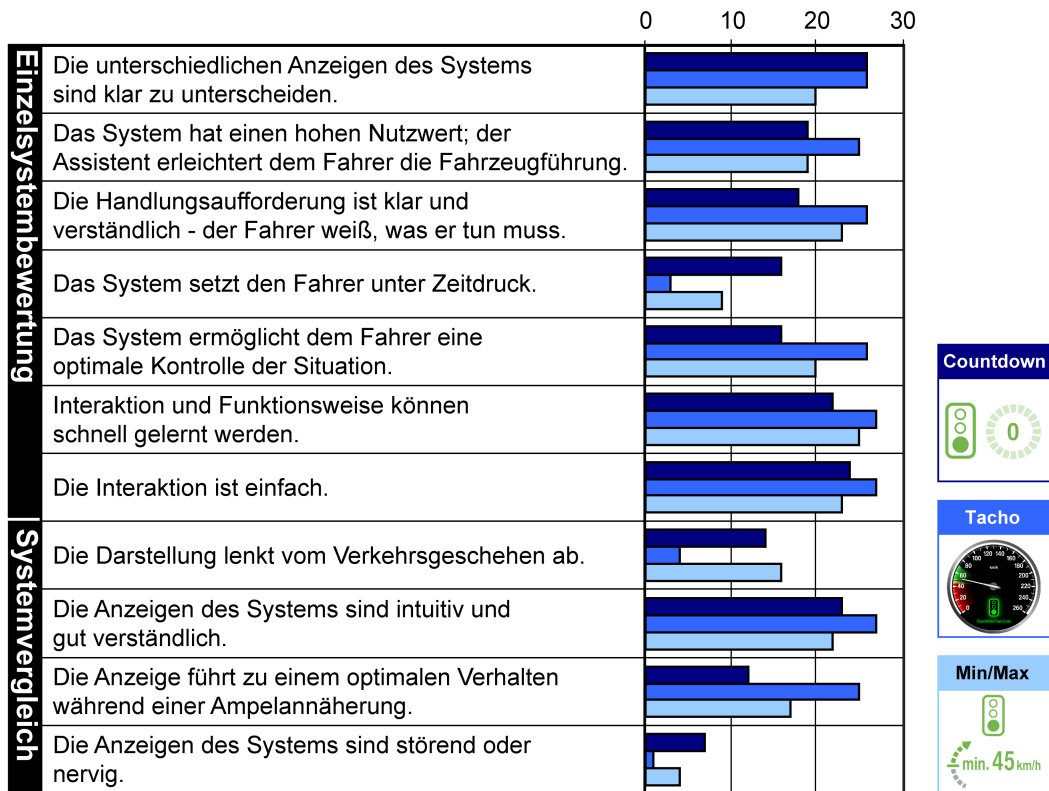
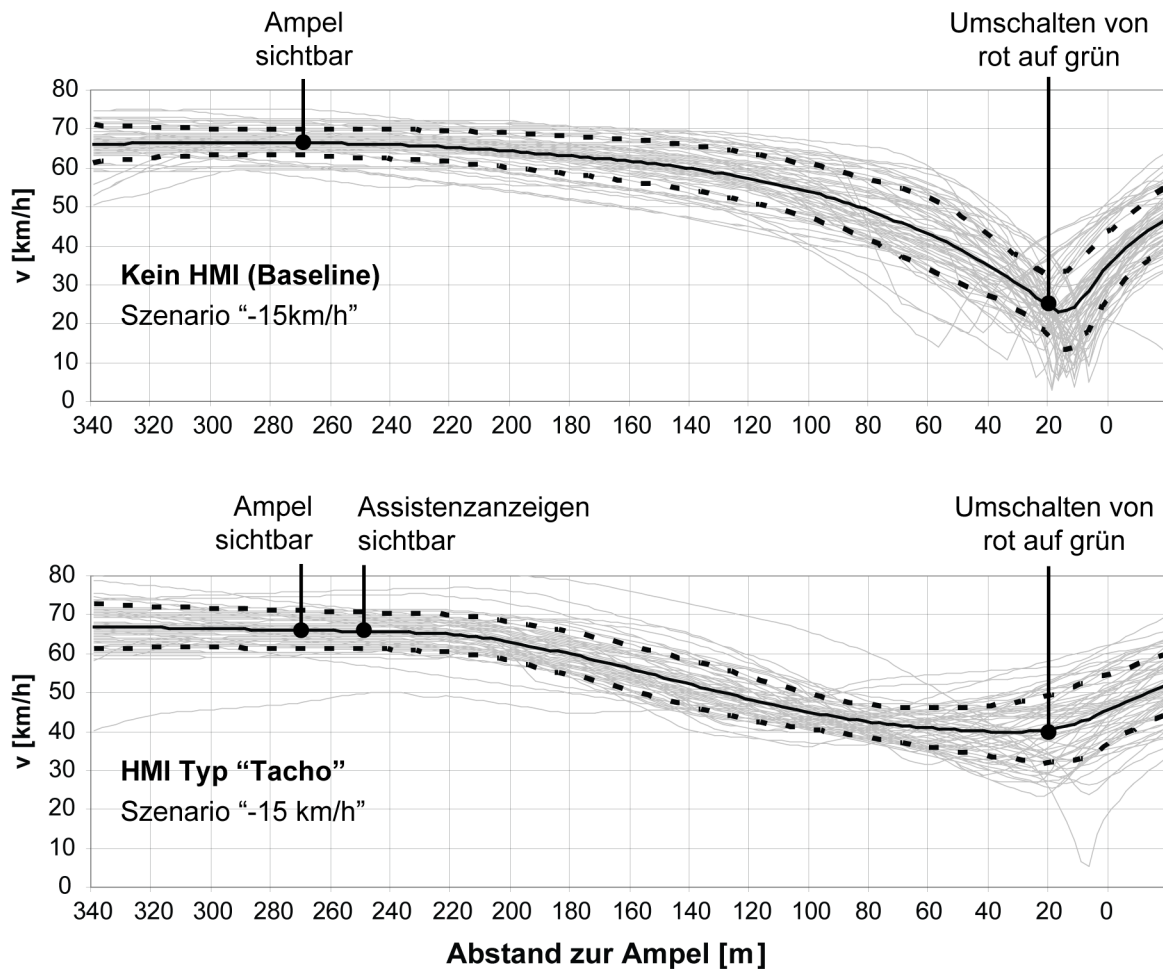


Abbildung 6.21: Anzahl der zustimmenden Antworten für die Aussagen des Fragebogens

108.60,  $p < 0,001$ ). Der Faktor „Wiederholung“ zeigte keinen signifikanten Einfluss bei der Varianzanalyse. Es zeigt sich also, dass die Art der Präsentation (drei Varianten und Baseline ohne Anzeige) einen starken Einfluss auf die Effektivität des Systems haben. Darüber hinaus ist es von der Verkehrssituation abhängig, ob das System eine Änderung des Fahrverhaltens bewirkt. Um die paarweise Signifikanz nachzuweisen, wurden abhängig vom Ergebnis des Normalverteilungstests t-Tests bzw. Wilcoxon Tests berechnet. In Abbildung 6.23 sind Mittelwerte, die auf einem Niveau von 0,05 signifikant unterschiedlich sind, mit Pfeilen gekennzeichnet.

### Blickverhalten

Das Blickverhalten der Probanden wurde ebenfalls in einem Bereich von 300 Meter vor bis 50 Meter nach der Ampel automatisiert ausgewertet. Alle drei Varianten wurden aus Gründen der Vergleichbarkeit im Tacho angezeigt (siehe Abbildung 6.12). Deshalb ist die Anzahl und die Dauer der Blicke auf den Tacho das entscheidende Kriterium. Durch die zusätzliche Ampelassistanzanzeige sollten sowohl die Anzahl der Blicke als auch die maximale Dauer der Blicke in einem möglichst geringen Maße ansteigen. In Abbildung 6.24 sind die mittleren Blickdauern für die unterschiedlichen Szenarien und die verschiedenen Anzeigevarianten



**Abbildung 6.22:** Geschwindigkeitsprofil über den Abstand zur Ampel aller Probanden für zwei Anzeigetypen und Mittelwert sowie Standardabweichung

in einer Grafik veranschaulicht. Zunächst fällt auf, dass die Zeiten für die Baseline-Fahrt kaum Unterschiede zwischen den einzelnen Szenarien aufweisen. Es handelt sich hierbei um vereinzelte Kontrollblicke, um die aktuell gefahrene Geschwindigkeit zu überprüfen. Toaka (1990) (zitiert nach Theofanou (2002)) gibt die mittlere Dauer für einen Tacho-Blick mit 0,62 Sekunden bei einer Standardabweichung von 0,48 Sekunden an. Dies stimmt exakt mit den in diesem Experiment ermittelten Zeiten überein (0,62 Sekunden im Mittel bei 0,28 Sekunden Standardabweichung). Die Baseline-Fahrt liefert damit plausible Blickdaten und stützt folglich die Validität des Experiments. Die mittleren Blickdauern der drei Fahrten mit Anzeige liegen – wie zu erwarten – über denen der Baseline-Fahrt. Jedoch treten kaum mittlere Blickdauern über einer Sekunde auf. Die mittlere Blickdauer auf ein Straßenschild wird von Toaka (1990) beispielsweise mit 1,6 Sekunden angegeben. Demnach befinden sich die in diesem Experiment ermittelten Werte in einem normalen Bereich. Da die Blickdaten großen Streuungen unterworfen sind und keine klare Rangfolge zwischen den einzelnen Anzeigevarianten

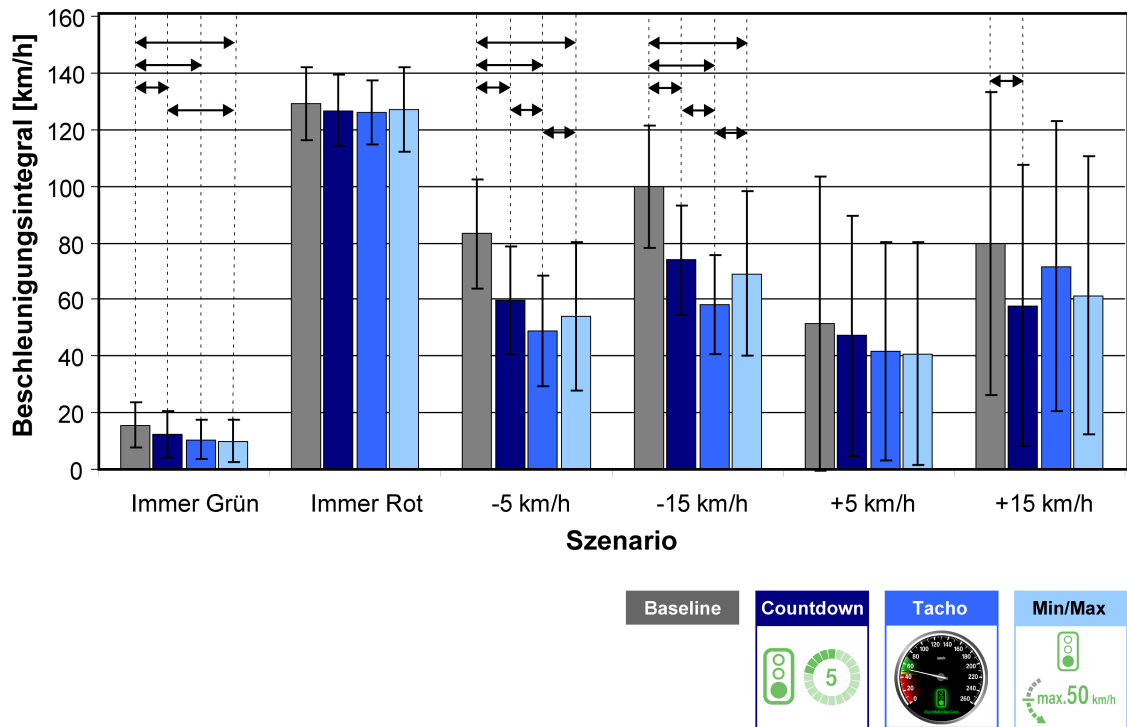


Abbildung 6.23: Vergleich des Beschleunigungsintegrals für die drei Anzeigevarianten und die Baseline-Fahrt ohne Anzeige

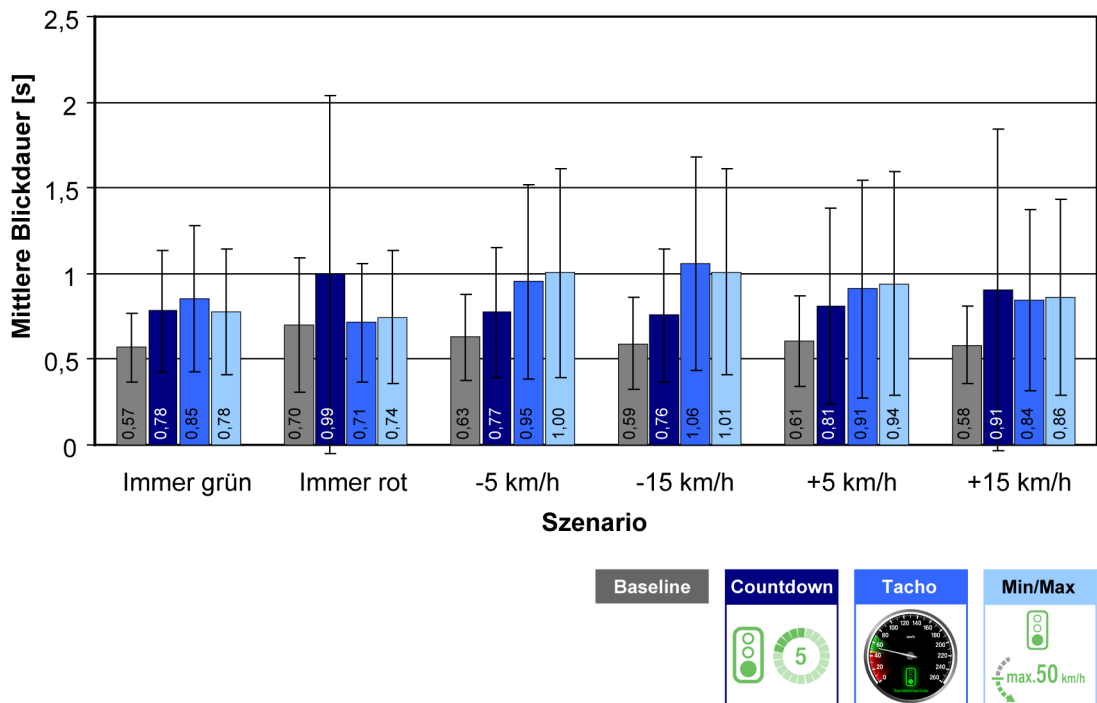


Abbildung 6.24: Vergleich der mittleren Blickzuwendungszeit zum Tacho für die drei Anzeigevarianten und die Baseline-Fahrt ohne Anzeige

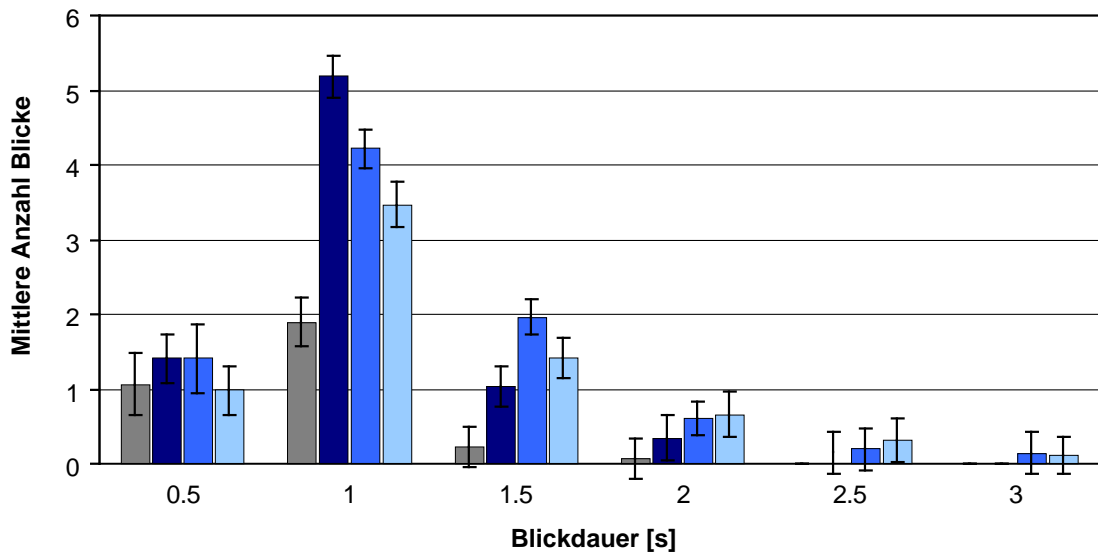
erkennbar ist, wird auf Signifikanztests verzichtet.

Abbildung 6.25a zeigt die mittlere Häufigkeit der Blickdauern für die drei Varianten und die Baseline-Fahrt für das Beispielszenario „-5 km/h“ und das jeweilige 95% Konfidenzintervall. Dabei fällt auf, dass die Variante „Countdown“ kurze Blicke begünstigt, wohingegen die beiden anderen Varianten tendenziell mehr längere Blicke erfordern. Die Vereinigung der amerikanischen Automobilhersteller (AAM) legt für Fahrerinformationssysteme einen Richtwert von zwei Sekunden für das 85. Perzentil der Blickdauernverteilung fest (Driver Focus-Telematics Working Group, 2003). Dieser Perzentilwert ist für das vorliegende Experiment für alle Szenarien und alle Anzeigevarianten über alle Probanden hinweg in Abbildung 6.25b grafisch dargestellt. Keine der drei Anzeigevarianten verletzt offensichtlich dieses Kriterium. Jedoch liegt der Perzentilwert für die Variante „Countdown“ in den Szenarien „-5 km/h“ und „-15 km/h“ deutlich unter den Werten der beiden anderen Varianten. Eine zeitbasierte Anzeige, welche sich in regelmäßigen, und damit für den Fahrer vorhersehbaren, Zeitintervallen verändert, führt tendenziell zu kürzeren und weniger häufigen Blicken.

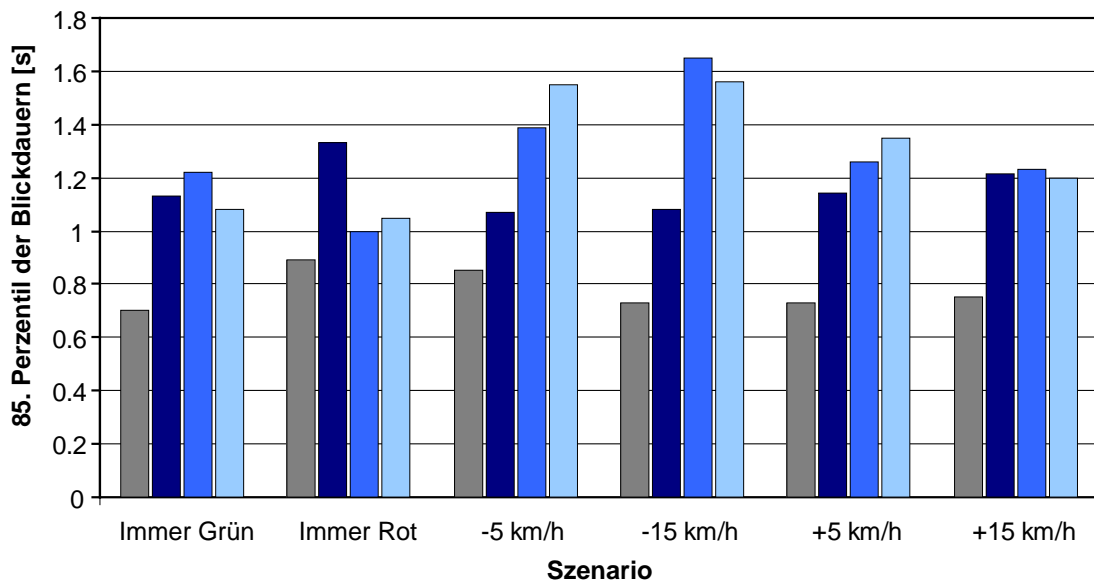
Es ist davon auszugehen, dass die Blickzuwendungen über einen längeren Nutzungszeitraum in Anzahl und Dauer abnehmen. Im Experiment wurde versucht diesen Lerneffekt nachzuweisen, indem jeder Proband jedes Szenario zweimal mit jedem Anzeigetyp durchfuhr (zwei Runden im Simulationskurs). Damit die erste und zweite Durchfahrt direkt anhand eines Wertes miteinander vergleichbar sind, dient in diesem Fall die mittlere akkumulierte Gesamtblickzuwendung zum Tacho als vergleichendes Maß. Abbildung 6.26 stellt die Differenz zwischen der ersten und der zweiten Durchfahrt dar. Werte im positiven Bereich deuten dementsprechend auf eine Verkürzung der Blickzuwendung während der zweiten Durchfahrt hin und sind ein Hinweis auf einen Lerneffekt. Sterne in der Abbildung kennzeichnen Differenzen, die nach einem t-Test für gepaarte Stichproben auf dem 5% Niveau signifikant sind. Die Auswertung ergibt zwar keine klare Unterscheidung der Varianten, es zeigt sich jedoch deutlich, dass alle drei Varianten während der zweiten Durchfahrt tendenziell zu kürzeren Gesamtblickzuwendungszeiten führen. Die Entscheidung, im vorliegenden Experiment keinen umgebenden Verkehr zu verwenden, mindert darüber hinaus die visuelle Beanspruchung der Probanden außerhalb des Fahrzeugs. Es ist anzunehmen, dass deshalb die Aufmerksamkeit der Versuchspersonen über einem natürlichen Maße im Innenraum des Fahrzeugs liegt. Dies ist die Folge des Neuigkeitseffekts einer bisher unbekanntem Anzeige.

### 6.2.9 Fazit & Diskussion

Der Versuch hat gezeigt, dass alle drei Anzeigevarianten intuitiv verständlich sind und im passenden Kontext keiner weiteren Erklärung für den Fahrer bedürfen. Der Versuch beschränkt sich allerdings auf einfache Kreuzungssituationen, in denen die Zuordnung zwischen der Ampel und der Anzeige im Fahrzeug gut ersichtlich ist. Viele Kreuzungen im realen Straßenverkehr weisen eine wesentlich höhere Komplexität auf. Die Zufahrten zur Kreuzung können beispielsweise gekrümmt und die Sichtbarkeit der Ampeln dadurch behindert sein. Ampeln

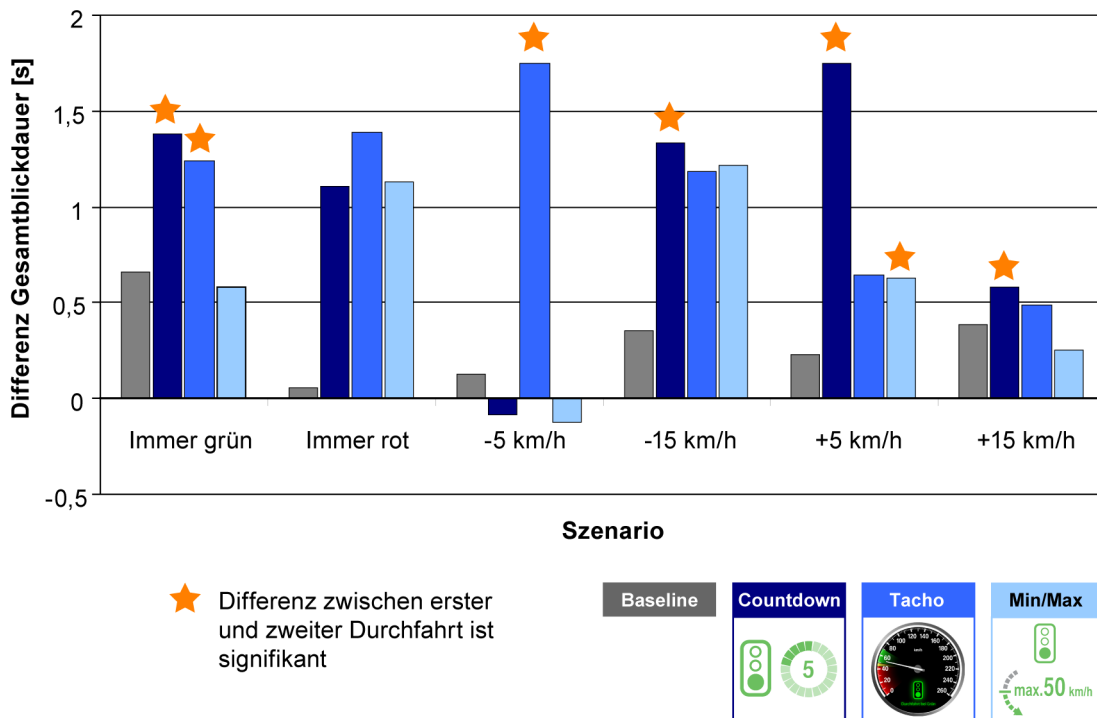


(a) Mittlere Anzahl der Blicke pro Ampeldurchfahrt für Szenario „-5 km/h“ und 95% Konfidenzintervall



(b) 85. Perzentil der Blickdauern für alle Szenarien

Abbildung 6.25: Auswertung der Blickdaten für die drei Anzeigevarianten und die Baseline



**Abbildung 6.26:** Differenz zwischen der mittleren akkumulierten Gesamtblickdauer der ersten und zweiten Durchfahrt

für verschiedene Fahrtrichtungen erschweren eine leichte Assoziation mit der Anzeige im Fahrzeug und erfordern eine genaue Kenntnis der vom Fahrer intendierten Fahrtroute. Die Übernahme der Richtungspfeile der Ampeln in die Anzeige könnte die Wiedererkennung durch den Fahrer begünstigen. Problematisch bleibt die Vorhersage des Abbiegewunsches des Fahrers. Eine Auswertung des Blinkers (der u.U. vom Fahrer nicht betätigt wurde) ist dazu nicht ausreichend. Das System müsste in der Lage sein, die aktuelle Fahrspur (geradeaus, Linksabbiegespur, etc.) zu bestimmen und die Geschwindigkeitsempfehlung auf Basis der zugehörigen Ampelphase berechnen. Erschwerend kommt hinzu, dass die Geschwindigkeit vor einem Abbiegemanöver im Normalfall reduziert werden muss und dies die Ausgabe einer über einen längeren Zeitraum gültigen Geschwindigkeitsempfehlung nahezu unmöglich macht. Es ist anzunehmen, dass eine sinnvolle Funktion des Systems nur bei einer geradeaus durchfahrenen Kreuzung gegeben ist.

Relativ unabhängig von diesen Umständen lässt sich die Akzeptanz der verschiedenen Anzeigen im Versuch beurteilen. Ob dem Probanden eine Anzeige gefällt, er damit gut umgehen kann und sie verständlich ist, kann auch in wenig komplexen Verkehrsszenarien abgefragt werden. Hier zeigte sich bei fast allen Fragestellungen ein tendenzieller Vorteil für die Tacho-Anzeige. Diese ist für die meisten Probanden am attraktivsten.

Die Effektivität des Systems hängt von der Art der Anzeige, aber auch in hohem Maße von der Verkehrssituation ab. Es ist leicht vorstellbar, dass eine maximal ungünstige Fahrzeugkonstellation vor der Kreuzung jegliche Geschwindigkeitsempfehlung unmöglich macht. Die

Wirksamkeit eines solchen Systems sinkt mit zunehmender Verkehrsdichte (Richter, 2005). Der Versuch konzentriert sich deshalb ausschließlich auf den Einfluss der Anzeige auf die Effektivität des Systems. Andere Einflüsse auf die Effektivität sind Störgrößen und nach Möglichkeit zu minimieren. Somit ist eine komplexe Verkehrsumgebung nicht erstrebenswert und wurde für diesen Versuch nicht umgesetzt. Die Auswertung der Daten ergibt einen signifikanten Vorteil der Tachovariante in drei Szenarien. Überraschend ist die Tatsache, dass selbst eine Empfehlung, die aktuelle Geschwindigkeit zu halten, zu einer Verringerung unnötiger Brems- und Beschleunigungsvorgänge führt. Liegen keine Zusatzinformationen eines Systems vor, scheinen die Fahrer vor einer grünen Ampel unbewusst zu beschleunigen, um die Kreuzung ohne Stopp passieren zu können. Dieser Effekt konnte signifikant nachgewiesen werden.

Die Darstellung im Kombi-Instrumenten-Display wird vom Fahrer aufgrund der Blickwinkelposition nur dann wahrgenommen, wenn er seine Aufmerksamkeit explizit darauf richtet. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass die Anzeige in einer komplexen Verkehrssituation keine Ablenkung erzeugt, sondern der Fahrer die Anzeige nur dann nutzt, wenn es die Situation erlaubt. Im Umkehrschluss bedeutet dies für die Ergebnisse aus dem durchgeführten Versuch, dass aufgrund des simplen Verkehrsszenarios mit einer unnatürlich hohen Zahl an Blicken auf die Anzeige zu rechnen ist. Ein Vergleich mit Richtwerten für Fahrerinformationssysteme zeigt jedoch, dass trotz des für diesen Aspekt unvorteilhaften Versuchsaufbaus alle beobachteten Blickverteilungen in einem akzeptablen Bereich liegen.

Unabhängig von der Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle ist die Frage zu diskutieren, wie ein System akzeptiert wird, das prinzipbedingt nur dann funktioniert, wenn die Ampel mit Kommunikations-Hardware ausgestattet ist. Gerade während der Einführung solcher Infrastruktur-Dienste (Matheus u. a., 2004) wird die niedrige Ausstattungsrate zu einer eingeschränkten Funktion führen. Weitere Experimente müssen zeigen, wie die Fahrer mit einer lückenhaften Funktion umgehen und welcher Ausstattungsgrad für sie noch akzeptabel ist.

Da die Tachovariante im Versuch am besten abgeschnitten hat, wurde diese in einem Versuchsträger der BMW Group implementiert (Pressefotos siehe Abbildungen 6.27 und 6.28) und im Rahmen eines Innovationstages der Öffentlichkeit präsentiert (BMW Group, 2007a). Für Details zur technischen Umsetzung sei auf das entsprechende INTERSAFE Deliverable verwiesen (Fuerstenberg u. a., 2007).

### **6.3 Kombination mit einer aktiven Geschwindigkeitsregelung**

Eine aktive Geschwindigkeitsregelung (engl. Adaptive/Active Cruise Control, ACC) ist ein Fahrerassistenzsystem, das dem Fahrer die Einhaltung einer Wunschgeschwindigkeit unter





**Abbildung 6.27:** Umsetzung der Tacho-Variante im BMW Versuchsträger



**Abbildung 6.28:** Versuchsträger und WLAN-Ampel auf dem BMW Messgelände

Berücksichtigung des Abstands zum vorausfahrenden Fahrzeug abnimmt. Derartige Systeme bieten viele Autohersteller bereits seit einigen Jahren an. Allerdings wurde die Fahrzeugführung vom Fahrzeug nur bis zu einer bestimmten Minimalgeschwindigkeit (bei BMW 30 km/h) unterstützt. Darunter musste der Fahrer die Kontrolle über die Längsführung des Fahrzeugs wieder übernehmen. Seit 2007 bietet die nächste Generation von ACC Systemen auch eine Regelung der Fahrzeuggeschwindigkeit bis in den Stillstand an (ACC Stop&Go z.B. im BMW 5er und 6er, Pasenau u. a. (2007), siehe auch Abbildung 6.29).

Ein ACC Stop&Go System ist in der Lage, die Geschwindigkeitsempfehlungen eines Ampelassistenzsystems direkt für die Regelung der aktuellen Geschwindigkeit zu nutzen (Palmquist, 1993). Diese Kombination entlastet den Fahrer, da die durch den Ampelassistenten zusätzlich eingeführte Regelaufgabe entfällt. Darüber hinaus ist es möglich, die Information über rote Ampeln zu verwenden, um eine Rotlichtmissachtung bei aktiviertem ACC Stop&Go auszuschließen. Deshalb wurde die Kombination dieser beiden Fahrerassistenzsysteme im Rahmen einer Diplomarbeit näher untersucht (Baltaci, 2009). Dabei lag der Fokus auf der Entwicklung eines Anzeige- und Bedienkonzepts, das auf der Logik des BMW ACC Stop&Go aufbaut. So können Fahrer, die bereits mit einem ACC System vertraut sind, die



**Abbildung 6.29:** Anzeigen des BMW ACC Stop&Go Systems im BMW 5er und Radarsensor unter dem Stoßfänger

neuen Funktionen leicht verstehen und die Bedienung schnell erlernen.

### 6.3.1 Anzeige- und Bedienlogik des BMW ACC Stop&Go Systems

Das ACC Stop&Go im BMW (im Folgenden nur noch ACC genannt) kennt folgende, für den Fahrer relevante, Zustände:

**Aus** Das System ist deaktiviert und der Fahrer regelt die Geschwindigkeit selbst.

**Standby** Das System ist bereit die Regelung der Geschwindigkeit zu übernehmen.

**Aktiv** Das System regelt die Geschwindigkeit des Fahrzeugs auf die vom Fahrer gewählte Wunschgeschwindigkeit. Zu Vorderfahrzeugen, die langsamer als diese Geschwindigkeit fahren, wird ein Sicherheitsabstand eingehalten (Sekundenabstand vom Fahrer wählbar).

**Aktiver Stand** Bremst das Vorderfahrzeug bis zum Stillstand, so verzögert auch das eigene Fahrzeug bis zum Stand. Fährt das Vorderfahrzeug innerhalb von drei Sekunden wieder an, setzt das eigene Fahrzeug die Fahrt automatisch fort. Bleibt das Fahrzeug länger als drei Sekunden stehen, so wechselt das System aus Sicherheitsgründen in den Zustand „Stillstand“.

**Stillstand** Fährt das Vorderfahrzeug an, so übermittelt das ACC System an den Fahrer einen „Go-Request“. Nur wenn der Fahrer diesen mit einem Tasten-Druck oder einer kurzen Gaspedalbetätigung bestätigt, fährt das eigene Fahrzeug wieder an.

**Übernahmeaufforderung** Wenn das ACC System die Regelung der Geschwindigkeit nicht länger übernehmen kann, fordert es den Fahrer auf, die Kontrolle wieder zu übernehmen („plötzliche“ Einscherer etc.).

Die verschiedenen Zustände werden dem Fahrer optisch und akustisch (im Falle einer Übernahmeaufforderung) vermittelt. Die Anzeigen für das ACC System befinden sich im Kombi-Instrumenten-Display und im Headup-Display. Auf die Beschreibung der Anzeigen im Headup-Display wird hier verzichtet, da diese ähnlich zu den übrigen Anzeigen gehalten sind. Abbildung 6.30 zeigt die Elemente der ACC Anzeige.

Die eingestellte Wunschgeschwindigkeit wird dem Fahrer über einen sog. *Scheibenzeiger* vermittelt. Dieser markiert die Geschwindigkeit direkt an der Tachoskala und zeigt zugleich durch seine Farbe den aktuellen Zustand des Systems (grün bei Zustand *Aktiv*, orange sonst). Die Symbolik zwischen den beiden Rundinstrumenten (B) soll die vorausliegende Straße andeuten. Die *Abstandsbalken* geben den gewählten Sekundenabstand zum Vorderfahrzeug an. Befindet sich ein Vorderfahrzeug im Sensorbereich und beeinflusst dieses die aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit, so wird dies durch ein gelbes Fahrzeugheck symbolisiert.

Dem Fahrer stehen Bedienelemente am Lenkrad zur Verfügung um die Wunschgeschwindigkeit und den Wunschabstand zu verändern. Darüber hinaus gibt es Tasten um das System an- oder auszuschalten und die momentan gefahrene Geschwindigkeit als Wunschgeschwindigkeit zu übernehmen. Auf eine detaillierte Beschreibung der Bedienung wird verzichtet, da diese für das Verständnis des Konzepts für das Gesamtsystem aus ACC und Ampelassistent unerheblich ist.

#### 6.3.2 Anzeige- und Bedienkonzept des Gesamtsystems

Für das Zusammenspiel der zwei Systeme wurden zwei Varianten der Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug betrachtet:

**Voll-Automatisch** Ist das ACC System aktiv und nähert sich das Fahrzeug einer Ampel an, so werden die Empfehlungen des Ampelassistenten automatisch umgesetzt. Das Fahrzeug hält automatisch vor roten Ampeln und verzögert frühzeitig, wenn die Ampel dadurch ohne Halt passiert werden kann (Maximum-Empfehlung, siehe Abschnitt 6.2).

**Semi-Automatisch** Das System hält automatisch vor roten Ampeln, die Übernahme von Geschwindigkeitsempfehlungen muss der Fahrer jedoch manuell bestätigen.

Die Übernahme von Beschleunigungsempfehlungen muss vom Fahrer in beiden Varianten bestätigt werden. Die Empfehlungen bzw. deren Übernahme verändern die eingestellte Wunschgeschwindigkeit nicht. Nach der Ampeldurchfahrt regelt das ACC wieder auf die eingestellte Wunschgeschwindigkeit. Die Berücksichtigung einer Geschwindigkeitsempfehlung oder einer roten Ampel für die ACC Regelung ist folglich zeitlich begrenzt. Es besteht Ähnlichkeit zu einem Vorderfahrzeug, das die Wunschgeschwindigkeit nicht beeinflusst, wohl aber die momentan vom ACC geregelte Geschwindigkeit. Eine Veränderung der Wunschgeschwindigkeit hätte zur Folge, dass der Fahrer nach jeder Ampeldurchfahrt eine Anpassung auf den ursprünglichen Wert durchführen müsste.



**Abbildung 6.30:** Scheibenzeiger (A) zur Markierung der aktuellen Wunschgeschwindigkeit und ACC Symbolik (B) zur Darstellung des Wunschabstands und zur Indikation eines erkannten Vorderfahrzeugs

Deshalb wird im vorgeschlagenen Anzeigekonzept das Symbol für das erkannte Vorderfahrzeug (siehe Abbildung 6.30) um ein Symbol für eine erkannte Ampel ergänzt. Die beiden Symbole werden niemals gleichzeitig angezeigt, da davon ausgegangen wird, dass entweder das Vorderfahrzeug oder die Ampel die momentane Geschwindigkeit beeinflusst. Fährt das Vorderfahrzeug beispielsweise langsamer als die Maximal-Geschwindigkeitsempfehlung es erfordern würde, so ist das Vorderfahrzeug die entscheidende Eingangsgröße für den ACC Regler. Ist das Vorderfahrzeug schneller, so ist die Empfehlung die obere Grenze für den Regler. Abbildung 6.31b zeigt den Fall einer Maximal-Geschwindigkeitsempfehlung und Abbildung 6.31c das Verzögern bis zum Stand vor einer roten Ampel.

Bei der voll-automatischen Variante reagiert das System ohne Fahrerinteraktion auf die Ampeln. Damit der Fahrer dennoch die Handlungen des Systems (Beschleunigen und Verzögern) versteht und diese überwachen kann, werden zusätzlich die Farbbereiche angezeigt. Um eine grafische Unterscheidbarkeit zwischen manueller und automatisierter Fahrt zu erreichen, werden die Farbbereiche während der automatischen Fahrt in einer leicht abgewandelten Form verwendet (vergleiche Abbildungen 6.31a und 6.31b).

Während der Wartezeit vor einer roten Ampel steht dem Fahrer ein Sekunden-Countdown zur Verfügung (Abbildung 6.31d). Diese Funktion wurde von allen Probanden des Versuchs in Abschnitt 6.2 positiv bewertet. Schaltet die Ampel auf Grün und steht das Fahrzeug bereits länger als drei Sekunden, so erhält der Fahrer einen Go-Request (Abbildung 6.31e). Bestätigt er diesen, wechselt das System zurück in den aktiven Modus und beschleunigt auf die eingestellte Wunschgeschwindigkeit.

In der semi-automatischen Ausprägung fordert das System den Fahrer zur Bestätigung der Übernahme der Geschwindigkeitsempfehlung auf (Abbildung 6.31f). Dies erfolgt im erarbeiteten Konzeptvorschlag über eine kurze Textmeldung. Nur wenn der Fahrer diese Meldung

per Tastendruck am Lenkrad bestätigt, reduziert das ACC System im Falle einer roten Ampel die Geschwindigkeit frühzeitig und vermeidet so einen Stopp an der Haltelinie. Analog dazu ist eine Bestätigung einer Beschleunigung vor einer grünen Ampel denkbar. Dies setzt voraus, dass die eingestellte Wunschgeschwindigkeit unter der zulässigen Höchstgeschwindigkeit liegt. Ansonsten bleibt dem System kein Spielraum für eine Beschleunigung. Die textbasierte Variante wurde einer reinen symbolischen Darstellung vorgezogen, da die Komplexität der Handlungsaufforderung nur schwer in ein Symbol zu fassen ist.

### 6.3.3 Fazit & Diskussion

Beide Systemvarianten wurden sowohl in einem Fahrsimulationsversuch als auch in einem Realversuch auf dem BMW Messgelände evaluiert. Da beide Versuche hauptsächlich auf die Überprüfung der Systemfunktionen abzielten und die Stichproben entsprechend klein ausfielen, sind daraus lediglich tendenzielle Aussagen zur Akzeptanz und Bedienbarkeit des Systems ableitbar. Im Simulatorversuch bevorzugten neun von dreizehn Probanden die vollautomatische System-Variante, da diese die größte Entlastung für den Fahrer herbeiführt. Einige Probanden sahen in der manuellen Übernahme der Geschwindigkeit einen Vorteil, da hier auch der nachfolgende Verkehr mit berücksichtigt werden kann. Fahrer, denen die zusätzlichen Informationen der Ampel nicht zur Verfügung stehen, können den Grund für das frühe Verzögern eines vorausfahrenden Fahrzeugs vor einer Ampel unter Umständen nicht nachvollziehen. Dieses Phänomen wird von Tropschuh und Remlinger (2001) als *relative Informationsdefizit* bezeichnet. Doisl (2008) schlägt eine Anzeige im Fahrzeugheck vor, die nachfolgende Fahrzeuge darauf hinweist, dass der Fahrer eine passende Parklücke sucht und dementsprechend das Tempo verlangsamt. Eine solche Anzeige oder ein entsprechender Schriftzug könnte auch Fahrzeuge kennzeichnen, die mit moderner Kommunikationstechnik ausgestattet sind. So ließen sich negative Effekte durch Fehlinterpretationen anderer Verkehrsteilnehmer vermeiden.

Auch bei der Kombination aus ACC Stop&Go und dem Ampelassistenten ist die Ausstattungsrate und die daraus resultierende Systemverfügbarkeit ein wichtiges Kriterium. Bei einer geringen Ausstattungsrate wird die Akzeptanz des Systems gering sein, da der Fahrer bei jeder Ampel kontrollieren muss, ob die Funktion zur Verfügung steht. Bei steigender Verbreitung besteht die Gefahr eines überproportional hohen Vertrauens in das System. Endsley und Kiris (1995) beschreiben diesen Zusammenhang als *over-reliance*. Der Fahrer schreibt dem System eine Zuverlässigkeit zu, die effektiv nicht vorliegt. Dies kann beispielsweise dann der Fall sein, wenn alle Ampelanlagen im Stadtbereich mit Kommunikationstechnik ausgestattet sind und der Fahrer nach längerer Zeit auf eine nicht ausgestattete Ampel außerorts trifft. Dann wird das Versagen der Automatisierung möglicherweise zu spät bemerkt und es kommt zu einer kritischen Verkehrssituation. Deshalb werden teil-automatisierte Varianten bis zu einer vollständigen Verbreitung eine größere Bedeutung haben. Hier bleibt der Fahrer im Regelkreis und tritt die Verantwortung nur fallweise an das System ab.



(a) ACC im Standby und Farbbereiche für manuelle Fahrt



(b) Vollautonome Regelung auf optimale Geschwindigkeit zum Erreichen der nächsten Grünphase



(c) Regelung bis zum Stillstand vor einer roten Ampel



(d) Countdown-Anzeige während der Wartezeit vor einer roten Ampel



(e) Go-Request nachdem die Ampel von Rot auf Grün umgeschaltet hat



(f) Angebot des ACC Systems an den Fahrer, für eine automatische Regelung der Geschwindigkeit (Semi-Automatische Variante)

Abbildung 6.31: Anzeigen des Gesamtsystems aus ACC Stop&Go und Ampelassistent

# ZUSAMMENFASSUNG

---

## 7.1 Wissenschaftlicher Beitrag und Schlussfolgerungen

Die Kapitel 4 und 5 beleuchten Aspekte einer für zukünftige Fahrerassistenzsysteme wichtigen Fragestellung. Die ergonomisch sinnvolle Kombination verschiedenster Warnsysteme im Fahrzeug – deren Anzahl Neuentwicklungen auf dem Gebiet der Kreuzungsassistenz deutlich erhöhen – ist eine Grundlage für deren gesellschaftlichen Nutzen.

Die im Rahmen der Arbeit durchgeführten Fahrsimulationsexperimente geben erste Hinweise, welche Menge an Zusatzinformationen dem Fahrer hilfreich ist und welcher Art diese sein sollten. Dabei stellt sich heraus, dass der Informationsgehalt von visuellen Warnungen in vielen Verkehrssituationen reduziert werden kann, ohne eine Verschlechterung der Fahrerreaktion zu riskieren. Diese Erkenntnis trägt zur Vereinfachung des Entwicklungsprozesses sowie der algorithmischen Umsetzung der Systeme bei.

Der akustische Kanal bietet hingegen Potenzial für differenziertere Ausgaben. Bisherige Warnsysteme nutzen bereits akustische Hinweise um den Fahrer möglichst schnell und eindringlich vor einer Gefahrensituation zu warnen. Untersuchungen in dieser Arbeit zeigen, dass eine Ergänzung des akustischen Signals um eine Richtungskomponente in einigen kritischen Verkehrssituationen einen positiven Einfluss auf die Reaktionszeit hat. Der Nachweis wird durch einen Fahrsimulationsversuch erbracht, in dem die Probanden verschiedene kritische Situationen meistern müssen und dabei von einem Warnsystem unterstützt werden. Das Warnsystem nutzt in einer Versuchsbedingung gerichtete akustische Hinweise, um dem Fahrer die Richtung der Gefahr anzuzeigen. Das Ergebnis kann in den Entwicklungsprozess künftiger Assistenzsysteme einfließen. Die technischen Voraussetzungen für eine gerichtete akustische Ausgabe sind in vielen Fahrzeugen bereits heute gegeben.

Auch in unkritischen Verkehrssituationen wird die Souveränität des Fahrers durch geeignete und ergonomisch sinnvoll präsentierte Zusatzinformation erhöht. Geschwindigkeitsempfehlungen auf den Zufahrten von Ampel-geregelten Kreuzungen helfen dabei, unnötige Standzeiten zu vermeiden und haben so nicht nur einen individuellen Nutzen sondern reduzieren in Folge auch den Schadstoffausstoß einer Fahrzeugflotte. Die vorliegende Arbeit vergleicht in Kapitel 6 unterschiedliche Anzeigevarianten bezüglich ihrer Tauglichkeit für den Straßenverkehr und der Akzeptanz durch den Fahrer. Hierbei werden systematisch verschiedene Ampelsituationen in einem Fahr-simulationsversuch erzeugt und das Verhalten der Probanden untersucht. Es stellt sich heraus, dass eine im Tacho integrierte Farb-Bereichs-Anzeige die höchste Effektivität und Nutzerakzeptanz aufweist. Countdownanzeigen, wie sie beispielsweise in manchen Ländern fest an Ampelanlagen montiert sind, haben dagegen einen geringeren positiven Effekt auf das Fahrverhalten. In einigen Fahrzeugen ist das klassische Kombiinstrumenten-Display bereits durch ein frei programmierbares Display ersetzt worden. Hier könnte eine solche Bereichs-Anzeige schon heute umgesetzt werden. Im Versuch erwies sich eine auf Text und Symbolsprache basierende Anzeigevariante als ebenfalls gut geeignet. Diese könnte in Fahrzeugen mit Head-up-Display Anwendung finden.

Moderne Fahrzeuge sind in der Lage mit Hilfe von ACC Stop&Go Systemen den Abstand zum Vorderfahrzeug automatisch einzuhalten und dabei auch bis in den Stillstand zu bremsen. Eine mit Kommunikationstechnik ausgerüstete Ampel könnte für diese Art von Systemen eine zusätzliche Eingangsgröße liefern und ebenfalls zur automatischen Geschwindigkeitsregelung herangezogen werden. Deshalb wird in Kapitel 6.3 ein Konzept zur Kombination der beiden Systeme am Beispiel der heutigen ACC-Bedienlogik im BMW erarbeitet. Da die Benutzerschnittstellen der ACC Systeme unterschiedlicher Hersteller ähnlich sind, lässt sich das Konzept verallgemeinern. Da jedes der beiden Systeme bereits eine hohe Komplexität aufweist (die der Fahrer neben der normalen Fahraufgabe bewältigen muss), fokussieren erste Untersuchungen vor allem auf die Verständlichkeit und Akzeptanz des Anzeige- Bedienkonzepts. Es konnte gezeigt werden, dass die Fahrer eine solche Funktionskopplung grundsätzlich als nützlich erachten und mit der Bedienung des Systems zurecht kommen.

## 7.2 Methodenbewertung

Für Untersuchungen von Anzeige- Bedienkonzepten ist im Sinne einer möglichst guten externen Validität von Versuchsergebnissen ein hoher Grad an Realismus wünschenswert. Soll ein System den Fahrer bei der primären Fahraufgabe unterstützen, so lässt sich die Fahraufgabe in einem Versuch nicht vollständig ausblenden. Dennoch gilt es abzuwägen, wie präzise die natürliche Straßenverkehrsumgebung nachgebildet werden muss. Im Versuch zur Beurteilung verschiedener visueller Warnungen aus Kapitel 4 sollen die Probanden mit einer großen Zahl an kritischen Situationen konfrontiert werden. Es erscheint nicht praktikabel dies in einem realen Fahrzeug zu untersuchen. Die verwendete Videoszenariotechnik erweist sich als grundsätzlich geeignet, setzt allerdings eine passende, künstliche mentale Ablenkung der Probanden voraus. Ohne eine zusätzliche Aufgabe sind die Probanden mit der Bearbeitung der



rein visuellen Präsentation unterfordert.

Die Versuche in Kapitel 5 und 6 weisen einen wesentlich höheren Grad an Realismus auf. Zur Erhebung des Fahrverhaltens während der Annäherung an Ampeln ist der in Kapitel 6 verwendete Simulatorversuch im statischen Simulator gut geeignet. Den Verlust der haptischen Rückmeldung beim Verzögern und Beschleunigen können die Probanden nach einigen Übungsrunden kompensieren und fahren dann ähnliche Geschwindigkeitsverläufe wie in der Realität. Die größten Schwierigkeiten bereitet das Verzögern bis in den Stillstand. Hier führt die Diskrepanz zwischen der fehlenden Beschleunigungswahrnehmung und den visuellen Reizen zu einer erhöhten Anzahl von Ausfällen durch Simulatorkrankheit. Der in Kapitel 5 durchgeführte Versuch zur Untersuchung gerichteter akustischer Warnungen stellt in dieser Hinsicht noch wesentlich höhere Anforderungen an die körperliche Leistungsfähigkeit der Probanden, da äußerst kurzfristige und schnelle Bremsmanöver – überwiegend bis in den Stillstand – unvermeidlich sind. Die komplizierte Auslöse-Logik der Situationen führt zu weiteren Ausfällen, sodass eine große Anzahl an Probanden notwendig ist, um Ereignisse in statistisch relevanter Anzahl zu erzeugen. Da die Lokalisationsleistung der Probanden durch die ungünstige Raumakustik im Simulator gelitten hat, sollten zukünftige Untersuchungen in einem Akustiklabor stattfinden.

## **7.3 Ausblick**

### **7.3.1 Integration von visuellen Warnungen**

Abbildung 4.1 auf Seite 59 in Kapitel 4 spannt für die Strategien zur Gruppierung von Warnungen exemplarisch ein Spektrum zwischen vollständiger Gruppierung und dedizierten Einzelwarnungen auf. Die vorliegende Arbeit beleuchtet lediglich einen kleinen Teil der denkbaren Abstufungen und Kombinationsmöglichkeiten. Insbesondere die Gruppierung nach Klassen von Gefahrensituationen (Fahrzeuge, Verkehrszeichen, etc.) ist ein vielversprechender Kompromiss zwischen den beiden untersuchten extremen Ausprägungen für visuelle Warnungen. Darüber hinaus sollten anschließende Arbeiten versuchen, die Ergebnisse aus den Videoszenarioversuchen auf das reale Verkehrsgeschehen zu übertragen.

### **7.3.2 Akustische Warnungen**

Die Versuche zu akustischen Warnungen beschränken sich lediglich auf die Ursprungsrichtung als einen möglichen Informationsträger im akustischen Signal. Weitere Versuche müssen zeigen, ob auch andere Ton-Parameter zur Verbesserung der Reaktionen im Kreuzungsbereich herangezogen werden können. Auch die Umsetzbarkeit im realen Fahrzeuginnenraum und die Alltagstauglichkeit des Ansatzes sollten näher betrachtet werden.

Haptische Rückmeldungen sind eine interessante Alternative zu den in dieser Arbeit behandelten visuellen und akustischen Warnungen. Auch hier steht ein breites Spektrum an Lösungsmöglichkeiten für die Integration verschiedener Warnungen zur Verfügung. Beispielsweise können weitere Experimente eine Antwort darauf liefern, ob gerichtete haptische Rückmeldungen (beispielsweise im Fahrersitz) einen positiven Effekt für die Reaktion auf Warnungen im Kreuzungsbereich haben.

### **7.3.3 Geschwindigkeitsempfehlungen**

Die Anzeigen zur Geschwindigkeitsempfehlung bei Ampelannäherungen sind nur ein Teil der immer größer werdenden Zahl an Systemen, die den Fahrer bei einer effizienten, möglichst kraftstoffsparenden Fahrweise unterstützen. Auch hier sind künftig integrative Ansätze gefragt, um den Fahrer nicht zu überfordern. Die grundsätzliche Umsetzbarkeit eines kombinierten Systems aus ACC Stop&Go und einem Ampelassistenten wurde im Simulator und im Realfahrzeug gezeigt jedoch ist die Akzeptanzuntersuchung lediglich rudimentär ausgeprägt. Ein statischer Simulator ist für die Untersuchungen eines Systems, das selbständig Geschwindigkeitsänderungen initiiert nicht geeignet. Die Probanden sind auf die rein visuelle Wahrnehmung angewiesen, die eine wesentlich trägere Erkennung von Geschwindigkeitsänderungen zulässt. Deshalb bietet sich eine Studie in einem dynamischen Simulator oder auf einer präparierten Versuchsstrecke in einem realen Fahrzeug an.

## **7.4 Schluss**

Die vorliegende Arbeit leistet einen Beitrag zur Optimierung der Mensch-Maschine-Schnittstelle im Fahrzeug und trägt so dazu bei, die Sicherheit für alle Verkehrsteilnehmer durch künftige Fahrzeuggenerationen zu erhöhen. Auch wenn das ursprünglich von der EU angestrebte Ziel, die Zahl der Verkehrstoten bis 2010 zu halbieren, verfehlt werden sollte, so haben die angestoßenen Forschungsprojekte wichtige Grundlagen für kommende Serienentwicklungen gelegt.

# INFORMATIONSGEHALT VON WARNMELDUNGEN

---

## A.1 Fragebogen

VP-ID: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

## Fragebogen

Bitte beantworten Sie die Fragen möglichst spontan und ohne großes Nachdenken.  
Alle Daten werden vertraulich behandelt.

**Alter:** \_\_\_\_\_

**Geschlecht:** männlich  weiblich

**Beruf:** \_\_\_\_\_

**Führerscheinbesitz:** seit \_\_\_\_ Jahren

**Wie viele km fahren Sie durchschnittlich in einem Jahr?**

Weniger als 5.000 km	5.000-10.000 km	10.000-20.000 km	Mehr als 20.000 km
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Benötigen Sie eine Brille zum Autofahren?**

Ja  Nein

**Besitzen Sie eine Farbschwäche?**

Ja  Nein  wenn ja, welche? \_\_\_\_\_

**Wie oft sind Sie bereits mit einem Fahrsimulator gefahren?**

0  1-2  3-5  6-10  >10

**Dürfen wir Sie weiterhin für Versuche anschreiben?**

Ja  Nein





**Vielen Dank für Ihre Auskunft !**

## **A.2 Situationsbeschreibungen Experiment 1**

## Anhang A Informationsgehalt von Warnmeldungen

Die Tabelle zeigt die Situationen aus Sicht des Probanden einige Sekunden vor dem Ausblenden des Videos. Es liegen nicht von allen Situationen Bildschirmabdrucke vor. Die Darstellungen sind teilweise verzerrt, da ein unnatürlich großer Winkelbereich auf eine ebene Darstellung abgebildet wird.

Nr	Situationsbeschreibung	Warnausgabe
1	<p><b>Ampel – leicht erkennbar</b> Der Fahrer nähert sich einer roten Ampel, die auf Grün umschaltet. Es wird dennoch eine Warnung ausgegeben.</p>	 Ampel
2	<p><b>Ampel – schwer erkennbar</b> Fahrer bemerkt eine rote Ampel zu spät, weil diese von einem LKW verdeckt wird. Es erfolgt eine Ausgabe einer Ampelwarnung.</p> 	 Ampel
3	<p><b>Ampel – Falschwarnung</b> Fahrer bemerkt eine rote Ampel nicht. Es wird jedoch eine Fußgängerwarnung ausgegeben.</p> 	 Fußgänger
4	<p><b>Ampel – 2. Handlung</b> Der Fahrer fährt ungebremst auf eine rote Ampel zu. Vor der Ampel existiert eine Nebenstraße. Auf Höhe der Nebenstraße wird eine Querverkehrswarnung ausgegeben.</p>	 Querverkehr von rechts
5	<p><b>Fußgänger – leicht erkennbar</b> Ein Fußgänger überquert die Straße. Es liegen keine Sichtverdeckungen vor (z.B. durch parkende Fahrzeuge)</p>	 Fußgänger
6	<p><b>Fußgänger – schwer erkennbar</b> Der Fahrer nähert sich hinter einem vorausfahrenden Fahrzeug einem Zebrastreifen. Das Vorderfahrzeug überfährt diesen ungebremst. Ein Fußgänger, der zunächst von einer Gruppe wartender Personen verdeckt ist, überquert kurz darauf die Straße.</p> 	 Fußgänger

Nr	Situationsbeschreibung	Warn- ausgabe
7	<p><b>Fußgänger – Falschwarnung</b>                      Der Fahrer erkennt einen Fußgänger, der hinter einer Mauer hervortritt und die Straße überquert zu spät.</p> 	 Ampel
	<p><b>Fußgänger – 2. Handlung</b>                      Nicht umgesetzt.</p>	
8	<p><b>Auffahrwarnung – leicht erkennbar</b>                      Der Fahrer fährt auf einer Straße innerorts. Auf der rechten Straßenseite sind Fahrzeuge geparkt. Ein Fahrzeug hat den Blinker gesetzt und will ausparken. Es verlässt jedoch ein weiteres Fahrzeug – ohne den Blinker zu setzen – eine Parklücke ohne den Verkehr zur beachten.</p> 	 Auffahr- warnung
9	<p><b>Auffahrwarnung – schwer/spät erkennbar</b>                      Der Fahrer fährt einige Minuten hinter einem Vorderfahrzeug auf einer Landstraße. Plötzlich bremst der Vorfahrer stark und setzt zum Linksabbiegen in die Nebenstraße an. Es wird eine Auffahrwarnung ausgegeben. Die Ausgabe erfolgt aufgrund der Situation spät. Dies wird für das Experiment als schwer erkennbar eingestuft.</p> 	 Auffahr- warnung
10	<p><b>Auffahrwarnung – Falschwarnung</b>                      Der Fahrer fährt auf der Landstraße auf eine Kreuzung zu. Ein zweites Fahrzeug aus der Nebenstraße auf die Hauptstraße und ordnet sich knapp vor dem Versuchsfahrzeug ein.</p>	 Fußgän- ger









Nr	Situationsbeschreibung	Warnausgabe
11	<p><b>Auffahrwarnung – 2. Handlung</b></p> <p>Der Fahrer folgt einem Fahrzeug auf einer Straße im Stadtbereich. Der Fahrer des vorausfahrenden Fahrzeugs bremst unvermittelt vor einer Ampel, die erst vor Sekundenbruchteilen auf Gelb geschaltet hat.</p> 	 Ampel
12	<p><b>Gegenverkehr – leicht erkennbar</b></p> <p>Der Fahrer möchte von der Hauptstraße in eine Nebenstraße links abbiegen. Die gewählte Lücke ist jedoch zu klein.</p> 	 Gegenverkehr
13	<p><b>Gegenverkehr – schwer/spät erkennbar</b></p> <p>Der Fahrer möchte von der Hauptstraße in eine Nebenstraße links abbiegen. Die gewählte Lücke ist zunächst groß genug, wird jedoch durch ein unrealistisch starkes Beschleunigen des Gegenverkehrs stark verkleinert. Es wird eine Gegenverkehrswarnung ausgegeben.</p> 	 Gegenverkehr
14	<p><b>Gegenverkehr – Falschwarnung</b></p> <p>Der Fahrer biegt an einer Landstraßenkreuzung links ab. Die Lücke die der Fahrer wählt könnte aus Sicht des Probanden eine Warnung gerechtfertigen.</p> 	 Auffahrwarnung
15	<p><b>Gegenverkehr – 2. Handlung</b></p> <p>Der Fahrer wartet auf eine passende Lücke beim Linksabbiegen. Als er anfährt, betritt ein Fußgänger die Straße. Es wird eine Gegenverkehrswarnung ausgegeben. Eine Warnung vor dem Fußgänger wäre jedoch ebenfalls gerechtfertigt.</p> 	 Fußgänger
16	<p><b>Querverkehr – einfach erkennbar</b></p> <p>Der Fahrer will eine Landstraßenkreuzung überqueren und übersieht dabei den herannahenden Querverkehr.</p> 	 Querverkehr von links

















Nr	Situationsbeschreibung	Warn- ausgabe
17	<p><b>Querverkehr – schwer erkennbar</b></p> <p>Der Fahrer nähert sich einer Rechts-vor-Links-Kreuzung. Ein vorfahrtsberechtigtes Fahrzeug nähert sich der Kreuzung von rechts. Die Sicht wird durch Häuser verdeckt.</p>	 Querverkehr von rechts
18	<p><b>Querverkehr – Falschwarnung</b></p> <p>Der Fahrer biegt mit abknickender Vorfahrt links ab und übersieht ein weiteres Fahrzeug, das die Vorfahrt missachtet und von rechts einschert</p> 	 Stoppschild
19	<p><b>Querverkehr – 2. Handlung</b></p> <p>Der Fahrer will eine stark befahrene Hauptstraße queren. Als er schließlich eine passende Lücke im Querverkehr findet und anfährt, überquert ein Fußgänger auf der gegenüberliegenden Straßenseite die Nebenstraße. Der Fußgänger ist erst spät sichtbar, da dieser hinter einem parkenden Fahrzeug hervortritt.</p>	 Fußgänger
20	<p><b>Stoppschild – leicht erkennbar</b></p> <p>Der Fahrer übersieht ein Stoppschild an einer X-Kreuzung.</p>	 Stoppschild
21	<p><b>Stoppschild – schwer erkennbar</b></p> <p>Der Fahrer übersieht ein durch parkende Fahrzeuge verdecktes Stoppschild. Es wird eine Stoppschildwarnung ausgegeben.</p>	 Stoppschild
22	<p><b>Stoppschild – Falschwarnung</b></p> <p>Der Fahrer überfährt umgebremst ein Stoppschild.</p> 	 Gegenverkehr
23	<p><b>Stoppschild – 2. Handlung</b></p> <p>Der Fahrer übersieht ein durch einen LKW verdecktes Stoppschild. Gleichzeitig kommt aus der vorfahrtsberechtigten Straße ein Fahrzeug.</p> 	 Querverkehr von rechts











## **A.3 Situationsbeschreibungen Experiment 2**


Die Tabelle zeigt die Situationen aus Sicht des Probanden einige Sekunden vor der Warnung. Es liegen nicht von allen Situationen Bildschirmabdrucke vor. Die Darstellungen sind teilweise verzerrt, da ein unnatürlich großer Winkelbereich auf eine ebene Darstellung abgebildet wird.

Nr	Situationsbeschreibung	Warnausgabe
1	<p><b>Ampel – schwer erkennbar</b>                      Fahrer bemerkt eine rote Ampel zu spät, weil diese von einem LKW verdeckt wird.</p> 	 Ampel
2	<p><b>Ampel – keine Warnung</b>                      Fahrer bemerkt eine rote Ampel nicht. Es wird jedoch keine Warnung ausgegeben.</p> 	keine
3	<p><b>Ampel – 2. Handlung</b>                      Der Fahrer will rechts abbiegen. Die Ampel schaltet im letzten Moment von Grün auf Rot. Es ist jedoch ein grüner Rechtsabbiegepfeil vorhanden. Die Fahrt könnte fortgesetzt werden.</p> 	 Ampel
4	<p><b>Ampel – Fehlwarnung</b>                      Der Fahrer nähert sich einer roten Ampel, die auf Grün umschaltet. Es wird dennoch eine Warnung ausgegeben.</p>	 Ampel
5	<p><b>Fußgänger – schwer erkennbar</b>                      Der Fahrer nähert sich hinter einem vorausfahrenden Fahrzeug einem Zebrastrifen. Das Vorderfahrzeug überfährt diesen umgebremst. Ein Fußgänger, der zunächst von einer Gruppe wartender Personen verdeckt ist, überquert kurz darauf die Straße. Es erfolgt die Ausgabe einer Fußgängerwarnung.</p> 	 Fußgänger

Nr	Situationsbeschreibung	Warnausgabe
6	<p><b>Fußgänger – keine Warnung</b></p> <p>Der Fahrer erkennt einen Fußgänger, der hinter einer Mauer hervortritt und die Straße überquert zu spät. Es wird dennoch keine Warnung ausgegeben.</p> 	keine
7	<p><b>Fußgänger – 2. Handlung</b></p> <p>Der Fahrer will eine stark befahrene Hauptstraße queren. Als er schließlich eine passende Lücke im Querverkehr findet und anfährt, überquert ein Fußgänger auf der gegenüberliegenden Straßenseite die Nebenstraße. Der Fußgänger ist erst spät sichtbar, da dieser hinter einem parkenden Fahrzeug hervortritt.</p>	 Fußgänger
8	<p><b>Fußgänger – Fehlwarnung</b></p> <p>Der Fahrer fährt auf einer zweispurigen Straße im Stadtbereich. Links und rechts parken Fahrzeuge am Straßenrand. Sporadischer Gegenverkehr. Es wird eine Fußgängerwarnung ausgegeben, obwohl kein Fußgänger in der Szene vorhanden ist.</p>	 Fußgänger
9	<p><b>Auffahrwarnung – schwer/spät erkennbar</b></p> <p>Der Fahrer fährt einige Minuten hinter einem Vorderfahrzeug auf einer Landstraße. Plötzlich bremst der Vorausfahrende stark und setzt zum Linksabbiegen in die Nebenstraße an. Es wird eine Auffahrwarnung ausgegeben. Die Ausgabe erfolgt aufgrund der Situation spät. Dies wird für das Experiment als schwer erkennbar eingestuft.</p> 	 Auffahrwarnung
10	<p><b>Auffahrwarnung – keine Warnung</b></p> <p>Der Fahrer fährt auf einer Straße innerorts. Auf der rechten Straßenseite sind Fahrzeuge geparkt. Ein Fahrzeug hat den Blinker gesetzt und will ausparken. Es verlässt jedoch ein weiteres Fahrzeug – ohne den Blinker zu setzen – eine Parklücke ohne den Verkehr zur beachten. Obwohl eine Auffahrwarnung gerechtfertigt wäre, wird keine Warnung ausgegeben.</p> 	keine

Nr	Situationsbeschreibung	Warn- ausgabe
11	<p><b>Auffahrwarnung – 2. Handlung</b></p> <p>Der Fahrer folgt einem Fahrzeug auf einer Straße im Stadtbereich. Der Fahrer des vorausfahrenden Fahrzeugs bremst unvermittelt vor einer Ampel, die erst vor Sekundenbruchteilen auf Gelb geschaltet hat. Der Proband erhält eine Auffahrwarnung (eine Ampelwarnung wäre ebenfalls gerechtfertigt).</p> 	 Auffahr- warnung
12	<p><b>Auffahrwarnung – Fehlwarnung</b></p> <p>Der Fahrer fährt auf der Landstraße auf eine Kreuzung zu. In sicherer Entfernung biegt ein zweites Fahrzeug aus der Nebenstraße auf die Hauptstraße und ordnet sich vor dem Versuchsfahrzeug ein. Obwohl keine Abstandsunterschreitung vorliegt wird eine Auffahrwarnung ausgegeben.</p>	 Auffahr- warnung
13	<p><b>Gegenverkehr – keine Warnung</b></p> <p>Der Fahrer möchte von der Hauptstraße in eine Nebenstraße links abbiegen. Die gewählte Lücke ist jedoch zu klein. Es erfolgt dennoch keine Ausgabe einer Warnung.</p> 	keine
14	<p><b>Gegenverkehr – schwer erkennbar</b></p> <p>Der Fahrer möchte von der Hauptstraße in eine Nebenstraße links abbiegen. Die gewählte Lücke ist zunächst groß genug, wird jedoch durch ein unrealistisch starkes Beschleunigen des Gegenverkehrs stark verkleinert. Es wird eine Gegenverkehrswarnung ausgegeben.</p> 	 Gegen- verkehr
15	<p><b>Gegenverkehr – 2. Handlung</b></p> <p>Der Fahrer wartet auf eine passende Lücke beim Linksabbiegen. Als er anfährt, betritt ein Fußgänger die Straße. Es wird eine Gegenverkehrswarnung ausgegeben. Eine Warnung vor dem Fußgänger wäre jedoch ebenfalls gerechtfertigt.</p> 	 Gegen- verkehr

Nr	Situationsbeschreibung	Warnausgabe
16	<p><b>Gegenverkehr – Fehlwarnung</b>                      Der Fahrer biegt an einer Landstraßenkreuzung links ab. Obwohl die Lücke im Gegenverkehr groß genug ist, wird eine Warnung ausgegeben.</p>	 Gegenverkehr
17	<p><b>Querverkehr – keine Warnung</b>                      Der Fahrer will eine Landstraßenkreuzung überqueren und übersieht dabei den herannahenden Querverkehr. Es wird dennoch keine Warnung ausgegeben.</p>	keine
18	<p><b>Querverkehr – schwer Erkennbar</b>                      Der Fahrer biegt mit abknickender Vorfahrt links ab und übersieht ein weiteres Fahrzeug, das die Vorfahrt missachtet und von rechts einschert</p> 	 Querverkehr von rechts
19	<p><b>Querverkehr – 2. Handlung</b>                      Ein aus einer Seitenstraße einbiegender Lieferwagen missachtet die Vorfahrt. Gleichzeitig schaltet weiter vorne im Straßenverlauf eine Ampel auf Rot.</p> 	 Querverkehr von rechts
20	<p><b>Querverkehr – Fehlwarnung</b>                      Der Fahrer nähert sich einer Rechts-vor-Links-Kreuzung. Es wird eine Querverkehrswarnung ausgegeben, obwohl sich kein weiteres Fahrzeug im Kreuzungsbereich befindet.</p>	 Querverkehr von rechts
21	<p><b>Stoppschild – keine Warnung</b>                      Der Fahrer überfährt umgebremst ein Stoppschild. Es wird dennoch keine Warnung ausgegeben.</p> 	keine
22	<p><b>Stoppschild – schwer erkennbar</b>                      Der Fahrer übersieht ein durch parkende Fahrzeuge verdecktes Stoppschild. Es wird eine Stoppschildwarnung ausgegeben.</p>	 Stoppschild
23	<p><b>Stoppschild – 2. Handlung</b>                      Der Fahrer übersieht ein durch einen LKW verdecktes Stoppschild. Gleichzeitig kommt aus der vorfahrtsberechtigten Straße ein Fahrzeug. Es erfolgt eine Stoppschildwarnung (Querverkehr wäre ebenfalls gerechtfertigt).</p> 	 Stoppschild

Nr	Situationsbeschreibung	Warn- ausgabe
24	<b>Stoppschild – Fehlwarnung</b> Der Fahrer biegt links in eine Hauptstraße ein. Obwohl kein Stoppschild vorhanden ist wird eine Stoppschildwarnung ausgegeben.	 Stopp- schild

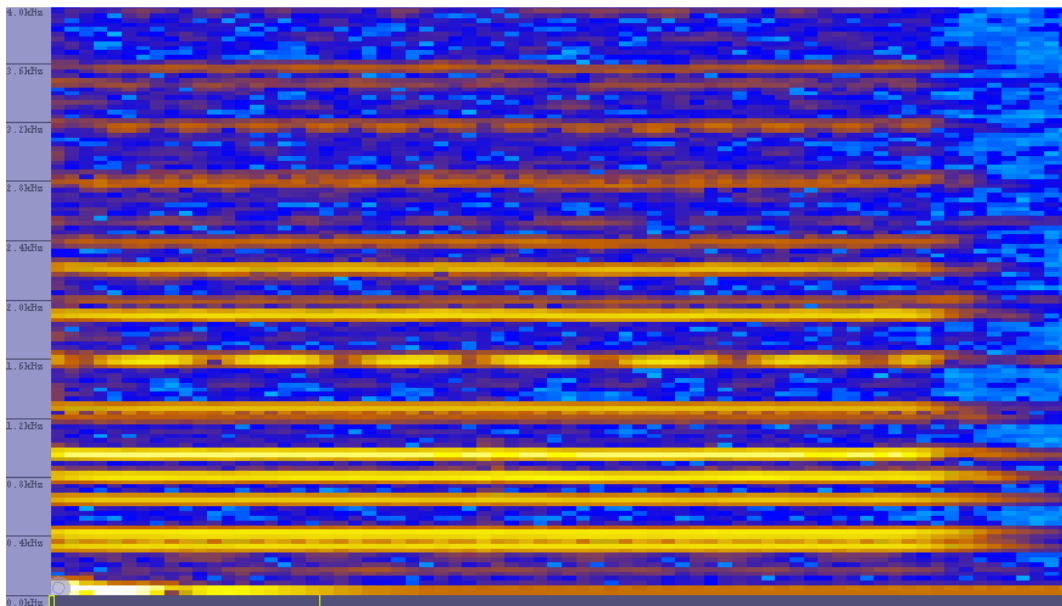




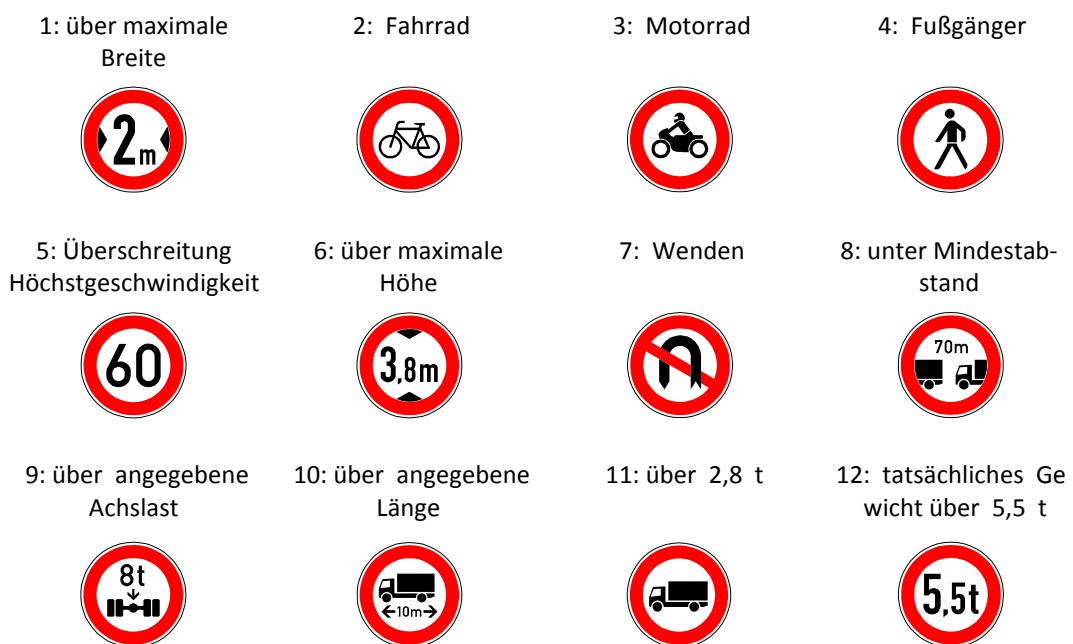
# AUDITIVE WARNMELDUNGEN

---

## B.1 Vorversuch



**Abbildung B.1:** Sonogramm des verwendeten Warntons



**Abbildung B.2:** Übersicht der in der experimentellen Voruntersuchung verwendeten Distraktoren

## B.2 Streckenführung im Hauptversuch

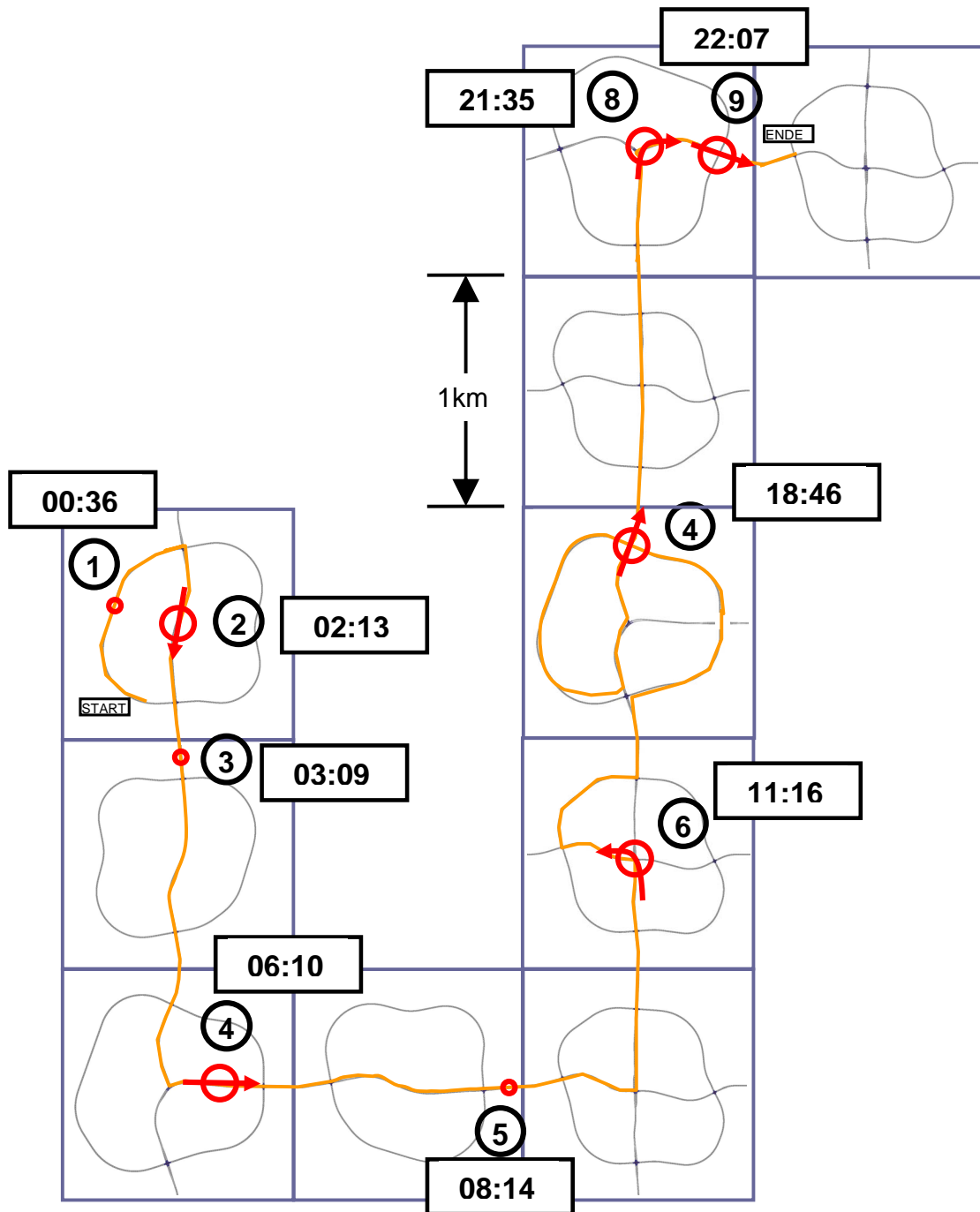











Abbildung B.3: Streckenführung mit den kritischen Situationen bzw. Fehlwarnungen sowie der Fahrzeit in Minuten und Sekunden

## **B.3 Situationsbeschreibungen**

Die Tabelle zeigt die Situationen aus der Vogelperspektive und eine Beschreibung des Ablaufs. Der blaue BMW 5er im Vordergrund ist das Simulationsfahrzeug, das durch den Probanden gesteuert wird.

Nr	Situationsbeschreibung	
1	<p><b>Fehlwarnung Auffahren</b></p> 	<p>Der Versuchsteilnehmer trifft auf ein parkendes Auto auf der eigenen Fahrspur bei vorhandenem Gegenverkehr. Wenn der Gegenverkehr die Stelle passiert hat, kann der Proband überholen, wobei ein Warnton aus dem vorderen Lautsprecher ausgelöst wird.</p>
2	<p><b>Gefahrensituation Bus (Bus)</b></p> 	<p>Der Teilnehmer fährt mit ca. 50 km/h eine innerstädtische Straße entlang und gelangt an eine Bushaltestelle mit Haltebucht, an der soeben ein Bus angehalten hat. Kurz vor dem Passieren dieser Haltestelle ertönt der Warnton ebenso aus dem vorderen Lautsprecher. Ungefähr 800 ms später betritt ein Fußgänger vor dem Bus die Straße. Die gesamte Zeit über befindet sich Gegenverkehr auf der Straße.</p>
3	<p><b>Fehlwarnung Gegenverkehr</b></p> 	<p>Im weiteren Verlauf der Fahrt wird ein Warnton beim Passieren eines einzelnen entgegenkommenden Autos aus dem vorderen Lautsprecher ausgelöst.</p>

Nr	Situationsbeschreibung	
4	<p><b>Gefahrensituation Spurwechsel (Spur)</b></p> 	<p>Die Versuchsperson fährt einem LKW hinterher, der kurze Zeit später seine Fahrt verlangsamt und am rechten Straßenrand hält. Auch hier muss der Versuchsteilnehmer den Gegenverkehr abwarten, bevor er am LKW vorbeifahren kann. Sobald zum Überholen angesetzt wird, ertönt ein Warnton aus der Richtung links hinten und ein nachfolgendes Auto überholt das Auto des Probanden und den stehenden LKW.</p>
5	<p><b>Fehlwarnung Fußgänger</b></p> 	<p>Der Proband fährt im Abstand von zwei Fahrzeuglängen einem vorausfahrenden Fahrzeug hinterher und es wird auf Höhe eines rechts stehenden Passanten der Warnton auf der rechten Seite ausgelöst.</p>
6	<p><b>Gefahrensituation Linksabbiegen (Links)</b></p> 	<p>Bei der Hälfte der Versuchsfahrt trifft der Versuchsteilnehmer auf eine Kreuzung, auf der er links abbiegt. Die Ampel steht bei der Ankunft auf Rot. Wenn sie nach kurzer Zeit auf Grün umschaltet, fährt die Versuchsperson auf die Mitte der Kreuzung, hält dort erneut an und muss eine geeignete Lücke im Gegenverkehr abwarten, um links abbiegen zu können. Sobald sie wieder anfährt, ertönt ein Warnton auf der linken Seite. Dieser soll den Probanden auf einen Fußgänger aufmerksam machen, der zur gleichen Zeit die Straße auf der Höhe der Fußgängerampel überschreitet.</p>

Nr	Situationsbeschreibung	
7	<p><b>Gefahrensituation Querverkehr (Quer)</b></p> 	<p>Nach einiger Fahrzeit ohne die Ausgabe einer Warnung ist einem vorausfahrenden PKW im Abstand von zwei Fahrzeuglängen zu folgen. Dieser PKW überfährt daraufhin ohne abzubremsen eine gleichrangige Kreuzung. Kurz bevor der Proband diese Kreuzung überfährt, ertönt eine akustische Warnung von rechts, die ihn auf einen sich schnell aus dieser Richtung nähernden PKW hinweisen soll, der Vorfahrt hat.</p>
8	<p><b>Gefahrensituation Radfahrer (Rad)</b></p> 	<p>Im letzten Teil der Versuchsfahrt trifft der Proband auf zwei vorausfahrende PKW, die vor ihm an einer Kreuzung mit roter Ampel anhalten. Wenn diese Ampel auf Grün schaltet, überqueren die Vorausfahrer die Kreuzung in Richtung geradeaus. Der Proband jedoch hat die Aufgabe, rechts abzubiegen. Sobald er in den Kreuzungsbereich eingefahren ist, ertönt ein Warnton von rechts hinten, der den Fahrer auf einen sich schnell nähernden Fahrradfahrer aufmerksam machen soll. Dieser Fahrradfahrer überquert die Kreuzung ebenso in Richtung geradeaus.</p>
9	<p><b>Gefahrensituation Querverkehr2 (Quer2)</b></p> 	<p>Diese Situation ist identisch mit der Situation Querverkehr. Zwei Veränderungen sind jedoch im Gegensatz zur ersten Querverkehrssituation vorhanden. Die erste Veränderung betrifft die Fahrzeugtypen des Vorausfahrenden und des querenden Fahrzeuges. Die zweite Veränderung betrifft den Warnton. Dieser wird hier nicht aus der Richtung der existierenden Gefahr (rechts) dargeboten, sondern aus der entgegengesetzten Richtung links.</p>





# AMPELASSISTENZVERSUCH

---

## C.1 Fragebogen

### C.1.1 Demographische Daten

VP-Code: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

---

## Demographischer Fragebogen

Bitte beantworten Sie die Fragen möglichst spontan und ohne großes Nachdenken.

Alle Daten werden vertraulich behandelt.

**Alter:** \_\_\_\_\_

**Geschlecht:** männlich  weiblich

**Beruf:** \_\_\_\_\_

**Führerscheinbesitz:** seit \_\_\_\_\_ Jahren

**Wie würden Sie Ihren eigenen Fahrstil einschätzen?**

Sehr zurückhaltend      Sehr sportlich

**Ich benötige eine Brille...**

- zum Autofahren: Ja  Nein
- zum Lesen: Ja  Nein

**Ich bin hinsichtlich folgender Farben Farbenblind bzw. besitze eine Farbschwäche:**

Rot/Grün  Blau/Gelb

**Darüber hinaus unterscheidet sich mein Sehvermögen hinsichtlich folgender Parameter von dem eines gesunden Auges:**

---

---

VP-Code:

Datum:

---

**Wie viele km fahren Sie durchschnittlich in einem Jahr?**

Weniger als

Mehr als

5.000 km

5.000-10.000 km

10.000-20.000 km

20.000 km

**...davon hauptsächlich :**

Stadtfahrten

Überlandfahrten

Autobahnfahrten

**Nutzen Sie privat oder beruflich ein**

**Navigationssystem im Pkw?**

Ja

Nein

**Spielen Sie privat Computerspiele?**

Ja

Nein

**Wie häufig spielen Sie Computerspiele mit einem Spielenkrad?**

nie      immer

**Haben Sie Erfahrung mit Fahrsimulatoren?**

Ja

Nein

**Wenn ja, wie oft sind Sie bereits mit einem Fahrsimulator gefahren?**

0

1-2

3-5

5-10

>10

**Haben Sie Erfahrungen mit anderen Arten von Simulatoren?**

Ja

Nein

**Wenn ja, mit welchen?**

---

---

**Vielen Dank für Ihre Auskunft !**

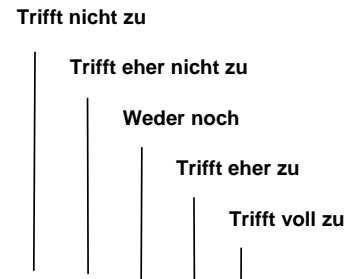
## **C.1.2 Bewertung eines Einzelsystems**

VP-Code:

Datum:

## Bewertung Variante 1: Sekunden-Countdown

Wir bitten Sie, die Ampelassistentz-Anzeige, welche Sie soeben im Simulator erlebt haben, anhand der folgenden Kriterien zu beurteilen:



Die unterschiedlichen Anzeigen des Systems sind klar zu unterscheiden.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das System hat einen hohen Nutzwert; der Assistent erleichtert dem Fahrer die Fahrzeugführung.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die Handlungsaufforderung ist klar und verständlich - der Fahrer weiß, was er tun muss.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das System setzt den Fahrer unter Zeitdruck.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das System ermöglicht dem Fahrer eine optimale Kontrolle der Situation.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Interaktion und Funktionsweise können schnell gelernt werden.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die Interaktion ist einfach.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

VP-Code:

Datum:

---

Was fanden Sie schlecht?

---

---

---

Was fanden Sie gut?

---

---

---

Verbesserungsvorschläge

---

---

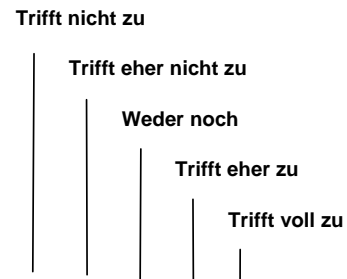
---

VP-Code:

Datum:

### Bewertung Variante 2: Bereichsanzeige im Tachometer

Wir bitten Sie, die Ampelassistent-Anzeige, welche Sie soeben im Simulator erlebt haben, anhand der folgenden Kriterien zu beurteilen:



	Trifft nicht zu	Trifft eher nicht zu	Weder noch	Trifft eher zu	Trifft voll zu
Die unterschiedlichen Anzeigen des Systems sind klar zu unterscheiden.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das System hat einen hohen Nutzwert; der Assistent erleichtert dem Fahrer die Fahrzeugführung.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die Handlungsaufforderung ist klar und verständlich - der Fahrer weiß, was er tun muss.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das System setzt den Fahrer unter Zeitdruck.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das System ermöglicht dem Fahrer eine optimale Kontrolle der Situation.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Interaktion und Funktionsweise können schnell gelernt werden.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die Interaktion ist einfach.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

VP-Code:

Datum:

---

Was fanden Sie schlecht?

---

---

---

Was fanden Sie gut?

---

---

---

Verbesserungsvorschläge

---

---

---

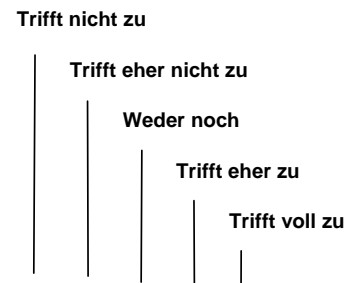


VP-Code:

Datum:

### Bewertung Variante 3: **Anzeige einer Minimal-/Maximalgeschwindigkeit**

Wir bitten Sie, die Ampelassistent-Anzeige, welche Sie soeben im Simulator erlebt haben, anhand der folgenden Kriterien zu beurteilen:



	Trifft nicht zu	Trifft eher nicht zu	Weder noch	Trifft eher zu	Trifft voll zu
Die unterschiedlichen Anzeigen des Systems sind klar zu unterscheiden.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das System hat einen hohen Nutzwert; der Assistent erleichtert dem Fahrer die Fahrzeugführung.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die Handlungsaufforderung ist klar und verständlich - der Fahrer weiß, was er tun muss.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das System setzt den Fahrer unter Zeitdruck.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das System ermöglicht dem Fahrer eine optimale Kontrolle der Situation.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Interaktion und Funktionsweise können schnell gelernt werden.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die Interaktion ist einfach.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

VP-Code:

Datum:

---

Was fanden Sie schlecht?

---

---

---

Was fanden Sie gut?

---

---

---

Verbesserungsvorschläge

---

---

---

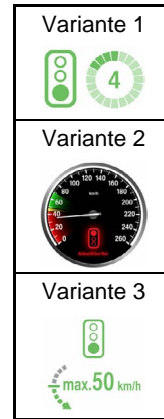
### **C.1.3 Vergleichende Bewertung**

VP-Code:

Datum:

## Vergleichende Bewertung

Nun möchten wir Sie bitten, zu den kennen gelernten Varianten Urteile abzugeben indem Sie die vorgegebenen Aussagen auf einer Skala von „trifft nicht zu“ bis „trifft voll zu“ beurteilen.



**Die Darstellung lenkt vom Verkehrsgeschehen ab.**

	Trifft nicht zu	Trifft eher nicht zu	Weder noch	Trifft eher zu	Trifft voll zu
Variante 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Variante 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Variante 3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Die Anzeigen des Systems sind intuitiv und gut verständlich.**

	Trifft nicht zu	Trifft eher nicht zu	Weder noch	Trifft eher zu	Trifft voll zu
Variante 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Variante 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Variante 3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Die Anzeige führt zu einem optimalen Verhalten während einer Ampelannäherung.**

	Trifft nicht zu	Trifft eher nicht zu	Weder noch	Trifft eher zu	Trifft voll zu
Variante 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Variante 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Variante 3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Die Anzeigen des Systems sind störend oder nervig.**

	Trifft nicht zu	Trifft eher nicht zu	Weder noch	Trifft eher zu	Trifft voll zu
Variante 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Variante 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Variante 3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

VP-Code: \_\_\_\_\_ Datum: \_\_\_\_\_



**Bitte beurteilen Sie die Systeme unter Berücksichtigung aller Aspekte auf der folgenden Skala:**

	sehr schlecht	schlecht	eher schlecht	weder noch	eher gut	gut	sehr gut
Variante 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Variante 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Variante 3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Bitte begründen Sie kurz Ihre Entscheidung:**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**Vielen Dank für Ihre Teilnahme !!!**



# Abbildungsverzeichnis

1.1	Statistik der Unfälle mit Personenschaden in Deutschland . . . . .	6
2.1	Das System Fahrer–Fahrzeug–Umfeld . . . . .	14
2.2	Drei-Ebenen-Modell der Fahraufgabe . . . . .	16
2.3	Menschliches Handlungsmodell . . . . .	16
2.4	Steigende Verantwortungsübernahme des Fahrzeugs . . . . .	19
2.5	BMW Nachtsichtsystem . . . . .	22
2.6	Zeitlicher Verlauf eines Unfalls . . . . .	23
2.7	Die Komponenten eines Fahrerassistenzsystems . . . . .	25
2.8	Durch Fahrerassistenzsysteme adressierte Szenarien im Kreuzungsbereich . .	26
2.9	Verschiedene Annäherungsverläufe an ein Stoppschild . . . . .	28
2.10	Konfliktzone beim Linksabbiegen . . . . .	30
2.11	Automatische Erkennung der Fahrzeugtrajektorien und Berechnung der Zeit- lücken beim Einbiegen mittels Bildverarbeitung . . . . .	31
2.12	Erkennung von verdeckten Fußgängern im AMULETT-Projekt . . . . .	31
2.13	Schematischer Aufbau eines Fahrsimulators der BMW Group Forschung und Technik . . . . .	33
2.14	Vereinfachung des MMI-Entwicklungsprozesses durch Nutzung von Adobe Flash als Front-End . . . . .	34
2.15	Im Rahmen der Arbeit entwickeltes MMI-Framework zur Darstellung von Fahrerassistenz-Anzeigen . . . . .	36
2.16	Automatisiert generierte Simulink-Blöcke/S-Functions zur Enkodierung bzw. Dekodierung von UDP-Paketen . . . . .	37
3.1	Subjektive Entscheidung einer Warnung zu folgen . . . . .	41
3.2	Verschiedene Auffahrwarnsymbole . . . . .	41
3.3	Abbildung zwischen der Dringlichkeit einer Warnung und der Gefahr in einer Situation nach . . . . .	43
3.4	Mögliche Orte für optische und haptische Rückmeldungen an den Fahrer am Beispiel des BMW 7er . . . . .	44
3.5	Beispiele für visuelle Warnungen im Auto . . . . .	46
3.6	Haptischer Fahrersitz . . . . .	48
3.7	Verzögerte Reaktionszeit auf zweiten Reiz . . . . .	49
3.8	Anzeigen im Flugzeugcockpit . . . . .	50
3.9	Abstrakte Segmentanzeige im Head-up-Display . . . . .	50
3.10	Head-up-Display des BMW 7er . . . . .	52

3.11	Aufteilung des Head-up-Displays in drei Gruppen . . . . .	53
3.12	Beispiele für kontaktanaloge Informationspräsentation im Fahrzeug . . . . .	54
3.13	Bahnplanungsverfahren für Kraftfahrzeuge auf der Basis elastischer Bänder . . . . .	56
4.1	Verschiedene Integrationsstrategien für Warnungen . . . . .	59
4.2	Die im Rahmen dieser Arbeit für das INTERSAFE Projekt konzipierten Warnsymbole (Fuerstenberg u. a., 2007) . . . . .	62
4.3	Warnsymbole für die sechs Einzelsysteme und die generische Warnung . . . . .	63
4.4	Fahrsimulatoraufbau mit fünf Plasmabildschirmen . . . . .	63
4.5	Zeitlicher Versuchsablauf . . . . .	63
4.6	Für den Versuch entwickelte Auswertesoftware . . . . .	64
4.7	Versuchsplan und Schema der Randomisierung der Reihenfolge der HMI-Typen und der Situationen . . . . .	67
4.8	Zeitlicher Versuchsablauf . . . . .	71
4.9	Critical Tracking Task . . . . .	73
4.10	Versuchsplan und Schema der Randomisierung der Reihenfolge der Situationen . . . . .	74
5.1	Schematischer Aufbau des Laborexperiments . . . . .	81
5.2	Aufbau des Laborexperiments . . . . .	81
5.3	Ziel- und Distraktorreize für Laborexperiment . . . . .	82
5.4	Wahlreaktionszeiten . . . . .	84
5.5	Anzahl der Fehler . . . . .	85
5.6	Aufbau des statischen Simulators . . . . .	87
5.7	Sitzkiste für den Hauptversuch . . . . .	87
5.8	Anzeigen in der Sitzkiste aus Sicht des Probanden . . . . .	88
5.9	Mittelwert und Standardabweichung der Reaktionszeiten . . . . .	91
5.10	Mittelwert und Standardabweichung der Reaktionszeiten für die Querverkehrssituation . . . . .	91
5.11	Zeitdauer vom Zeitpunkt der Warnung bis zur ersten Fixation des in der jeweiligen Situation gefährlichen bzw. gefährdeten Objektes . . . . .	94
5.12	Lokalisationsleistung der beiden Probandengruppen . . . . .	95
5.13	Anzeigen der Einparkhilfe <i>Park Distance Control</i> (PDC) im BMW . . . . .	96
6.1	StVO Zusatzzeichen zur Kennzeichnung einer abgestimmten Ampelschaltung . . . . .	99
6.2	Dynamische Grüne-Welle-Anzeige am Straßenrand in den Niederlanden . . . . .	99
6.3	Anzeige zur Empfehlung der Annäherungsgeschwindigkeit im Kombiinstrument . . . . .	101
6.4	Anzeige aus zur Anzeige des relativen „Abstands“ zur grünen Welle . . . . .	101
6.5	Anzeige aus zur Empfehlung der Annäherungsgeschwindigkeit integriert in die Tachoanzeige . . . . .	102
6.6	Anzeige zur Geschwindigkeitsempfehlung aus dem Projekt Travolution . . . . .	102
6.7	Dynamische Grüne-Welle-Geschwindigkeits-Empfehlungen . . . . .	102
6.8	Informationsdisplay mit Anzeige für grüne Welle . . . . .	103
6.9	Restzeitanzeige für Autofahrer in Hamburg und Heuer-Ampel . . . . .	103



---

6.10	Entwurf der Countdownanzeige für die Restzeit in der Grünphase . . . . .	107
6.11	Entwurf der digitalen Minimal-/Maximalempfehlung . . . . .	107
6.12	Entwurf der analogen Bereichsanzeige im Tacho . . . . .	108
6.13	Systemzustände der Anzeigevarianten „Minimal-/Maximal-Geschwindigkeit“ und „Kombiinstrumentendisplay“ . . . . .	109
6.14	Schematische Darstellung zur Berechnung der Ampelschaltung für ein Bei- spielszenario . . . . .	111
6.15	Beispiel für den Verlauf der Beschleunigung während einer Ampeldurchfahrt	113
6.16	SMI Eyetracking System mit Kamera, Infrarotscheinwerfern und Kopfband .	114
6.17	Schematische Darstellung des Fahrsimulationskurs . . . . .	116
6.18	Struktureller und zeitlicher Ablauf des Versuchs . . . . .	117
6.19	Aufbau des statischen Simulators . . . . .	118
6.20	Kombiinstrument in der Sitzkiste mit Min-/Max-Anzeige . . . . .	118
6.21	Anzahl der zustimmenden Antworten für die Aussagen des Fragebogens . . .	120
6.22	Geschwindigkeitsprofil über den Abstand zur Ampel . . . . .	121
6.23	Vergleich des Beschleunigungsintegrals für die drei Anzeigevarianten und die Baseline-Fahrt ohne Anzeige . . . . .	122
6.24	Vergleich der mittleren Blickzuwendungszeit . . . . .	122
6.25	Auswertung der Blickdaten für die drei Anzeigevarianten und die Baseline . .	124
6.26	Differenz zwischen der mittleren akkumulierten Gesamtblickdauer der ersten und zweiten Durchfahrt . . . . .	125
6.27	Umsetzung der Tacho-Variante im BMW Versuchsträger . . . . .	127
6.28	Versuchsträger und WLAN-Ampel auf dem BMW Messgelände . . . . .	127
6.29	Anzeigen des BMW ACC Stop&Go Systems im BMW 5er und Radarsensor unter dem Stoßfänger . . . . .	128
6.30	ACC Anzeigen im BMW . . . . .	130
6.31	Anzeigen des Gesamtsystems aus ACC Stop&Go und Ampelassistent . . . . .	132
B.1	Sonogramm des verwendeten Warntons . . . . .	151
B.2	Übersicht der in der experimentellen Voruntersuchung verwendeten Distrak- toren . . . . .	152
B.3	Streckenführung mit den kritischen Situationen bzw. Fehlwarnungen sowie der Fahrzeit in Minuten und Sekunden . . . . .	153



# Tabellenverzeichnis

2.1	Die verschiedenen Stufen der Automation . . . . .	19
4.1	Beispiel für Situationsbeschreibungen für die vier Stufen des Faktors <i>Warnsituation</i> für das Warnsystem <i>Querverkehr</i> . . . . .	66
4.2	Anzahl der Probanden, die richtig geantwortet haben für die Warnsituation <i>Schwer erkennbar</i> . . . . .	69
4.3	p-Werte für den Vergleich der Anzahl der richtigen Antworten unter den Bedingungen <i>Generisches Warnsymbol</i> und <i>Spezifisches Warnsymbol</i> . . . . .	69
4.4	Durchschnitt und Standardabweichung der Reaktionszeiten in Sekunden . . . . .	76
5.1	Versuchsplan mit Zellenbesetzung für einen Probanden . . . . .	83
5.2	Wahlreaktionszeiten . . . . .	83
5.3	Reaktionszeiten . . . . .	92
5.4	Blickreaktionszeiten . . . . .	95
6.1	Mögliche Varianten zur Präsentation einer Zusatzinformation während der Annäherung an eine Lichtsignalanlage . . . . .	105
6.2	Zuordnung der Situationen zu den einzelnen Kreuzungen des Simulationskurs . . . . .	116



# Literaturverzeichnis

- AUDI AG (2008): *Audi Pressemitteilung: „Travolution“ sorgt für Grüne Welle.* – URL [http://www.audi.de/de/brand/de/unternehmen/aktuelles/unternehmen.detail.2008~07~\\_Travolution\\_\\_sorgt\\_fuer\\_Gruene\\_Welle.html](http://www.audi.de/de/brand/de/unternehmen/aktuelles/unternehmen.detail.2008~07~_Travolution__sorgt_fuer_Gruene_Welle.html). – Zugriffsdatum: 26.12.2008
- BAGHERI, Nasrine ; JAMIESON, Greg A. (2004): Considering Subjective Trust and Monitoring Behavior in Assessing automation-Induced “Complacency“. In: *Human Performance, Situation Awareness and Automation Conference*. Marietta, USA : SA Technologies
- BALTACI, Burcu (2009): *Integration von ACC Stop&Go und Ampelassistent*, Ludwig-Maximilians-Universität München, Institut für Informatik, Diplomarbeit
- BENMIMOUN, A. ; CHEN, Jian ; SUZUKI, T. (2007): Design and Practical Evaluation of an Intersection Assistant in Real World Tests. In: *Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, S. 606–611
- BERGMEIER, Ulrich ; BUBB, Heiner (2008): Methodik zur kontaktanalogen Visualisierung von Fahrerassistenzinformationen. In: *54. Frühjahrskongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.*, S. 125–128
- BERNDT, H. ; WENDER, S. ; DIETMAYER, K. (2007): Driver Braking Behavior during Intersection Approaches and Implications for Warning Strategies for Driver Assistant Systems. In: *Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, S. 245–251
- BERNOTAT, R. (1970): Anthropotechnik in der Fahrzeugführung. In: *Ergonomics* Bd. 13, S. 353–377
- BÜHL, Achim ; ZÖFEL, Peter (2004): *SPSS 12. Einführung in die moderne Datenanalyse unter Windows*. Pearson Studium
- BMW GROUP (2007a): *BMW Group Medieninformation – Innovationstag der BMW Group Forschung und Technik 10/2007.* – URL [http://www.pressebox.de/attachment/78861/bmw\\_group\\_forschung\\_technik\\_d.pdf](http://www.pressebox.de/attachment/78861/bmw_group_forschung_technik_d.pdf). – Zugriffsdatum: 15.02.2009
- BMW GROUP (2007b): *BMW EfficientDynamics.* – URL <http://www.bmw.de/efficientdynamics/>. – Zugriffsdatum: 07.10.2009
- BMW PRESSCLUB (2008): *BMW Pressclub Deutschland.* – URL <http://www.pressclub.bmw.de>. – Zugriffsdatum: 28.12.2008
- BORTZ (2005): *Statistik: Für Human- und Sozialwissenschaftler*. Berlin : Springer

- BRAESS, H.-H. ; DONGES, E. (2006): Technologien zur aktiven Sicherheit von Personenkraftwagen - "Konsumierbare" oder echte Verbesserungen? In: 2. Tagung "Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz". Garching b. München
- BREISINGER, Marcus (2007): *Anzeigekonzept für Head-Up Displays im Automotive Bereich*, Ludwig-Maximilians-Universität München, Institut für Informatik, Lehr- und Forschungseinheit Medieninformatik, Diplomarbeit
- BREZNITZ, Shlomo (1984): *Cry Wolf: The Psychology of False Alarms*. Lawrence Erlbaum Associates Inc.
- BRÜHNING, Ekkehard ; SEECK, Andre (2006): Mutiger Umgang mit Fahrerassistenzsystemen. In: *VDI-Berichte Nr. 1960*
- BROY, Verena (2007): *Benutzerzentrierte, graphische Interaktionsmetaphern für Fahrerinformationssysteme*, Technische Universität München, Institut für Informatik, Dissertation
- BUBB, Heiner (1975): *Untersuchung über die Anzeige des Bremsweges im Fahrzeug*, Technische Universität München, Dissertation
- BUBB, Heiner (1993): Systemergonomische Gestaltung. In: SCHMIDTKE, H. (Hrsg.): *Ergonomie*. 3. Auflage. München-Wien : Carl Hanser-Verlag, S. 390–407
- BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG (2001): *INVENT: Kurzdarstellung des Teilprojektes VAS als ergänzende Information zur INVENT-Broschüre / Bundesministerium für Bildung und Forschung. – Technischer Bericht*
- BURDETT, Ricky ; SUDJIC, Deyan (2007): *The Endless City*. Phaidon, Berlin
- CAMPBELL, John L. ; HOFFMEISTER, David H. ; KIEFER, Raymond J. ; SELKE, Daniel J. ; GREEN, Paul ; RICHMAN, Joel B. (2004): *Comprehension Testing of Active Safety Symbols / SAE International. – Technischer Bericht*
- CLARK, James H. (1976): Hierarchical geometric models for visible-surface algorithms. In: *ACM SIGGRAPH Computer Graphics* Bd. 10. Association for Computing Machinery, S. 267–267
- CUMMINGS, M. L. ; KILGORE, Ryan M. ; WANG, Enlie ; TIJERINA, Louis ; KOCHHAR, Dev S. (2007): Effects of Single Versus Multiple Warnings on Driver Performance. In: *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* Bd. 49, Nr. 6. Human Factors and Ergonomics Society, S. 1097–1106
- DAIMLER AG (2008): *Smart Micro Hybrid Drive*. – URL <http://www.smart.com> . – Zugriffsdatum: 26.09.2008
- DARMS, Michael ; HILLS, Auburn ; RYBSKI, Paul E. ; URMSON, Chris (2008): Vehicle detection and tracking for the Urban Grand Challenge. In: 3. Tagung "Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz". Garching b. München, Deutschland
- DEUTSCHES BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG (1970): *Straßenverkehrs-Ordnung*

- DEUTSCHLE, Stephan (2005): Wer fährt? - Der Fahrer oder das System. In: *Straßenverkehrsrecht, Zeitschrift für die Praxis der Verkehrsjuristen*, Nr. 6, S. 201–206
- DI VERDI, S. ; HOLLERER, T. ; SCHREYER, R. (2004): Level of detail interfaces. In: *Proc. Third IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality ISMAR 2004*, S. 300–301
- DOISL, Christian (2008): *Systemergonomische Analyse von Anzeige- und Bedienkonzepten zur Unterstützung des Parkvorgangs*, Technische Universität München, Fakultät für Maschinenwesen, Dissertation
- DOISL, Christian M. (2004): *Entwicklung und Evaluierung aktueller multimodaler Ausgaben für eine Kollisionswarnung im KFZ*, Technische Universität München, Lehrstuhl Für Mensch-Maschine-Kommunikation, Diplomarbeit
- DORNEICH, M. C. ; VERVERS, P. M. ; GOOD, M. D. (2001): Design and evaluation of an integrated avionics alerting system. In: *Proc. DASC Digital Avionics Systems The 20th Conference* Bd. 1, S. 5D1/1–5D1/12
- DORRER, Claus (2003): *Effizienzbestimmung von Fahrweisen und Fahrerassistenz zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs unter Nutzung telematischer Informationen*, Fakultät Maschinenbau, Universität Stuttgart, Dissertation
- DRIVER, Jon ; SPENCE, Charles (1998): Cross-modal links in spatial attention. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society* Bd. 353. The royal society, S. 1319–1331
- DRIVER FOCUS-TELEMATICS WORKING GROUP (2003): Statement of Principles, Criteria and Verification Procedures on Driver Interactions with Advanced In-Vehicle Information and Communication Systems / Alliance of Automobile Manufacturers. – Technischer Bericht
- DUIVENVOORDEN, Kirsten (2007): *Roadside versus in-car speed support for a green wave: a driving simulator study*, University of Twente, Enschede, Diplomarbeit
- EDWORTHY, Judy ; ADAMS, Austin (1996): *Warning Design: A Research Prospective*. Taylor & Francis
- EHMANN, Dirk ; AULBACH, Johannes ; STROBEL, Tobias ; MAYSER, Christoph ; KOPF, Matthias ; DISCHER, Christian ; FISCHER, Julian ; OSZWALD, Florian ; ORECHER, Sebastian (2008): Aktive Sicherheit und Fahrerassistenz. In: *Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), ATZextra BMW 7er*. GWV Fachverlage GmbH, S. 114–119
- ELIASSON, A. ; GROVES, D. (1992): A Prometheus Head-up Display Demonstrator Vehicle. In: *Proc. 3rd International Conference on Vehicle Navigation and Information Systems VNIS*, S. 233–239
- ENDSLEY, Mica R. ; KIRIS, Esin O. (1995): The Out-of-the-Loop Performance Problem and Level of Control in Automation. In: *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* Bd. 37, Nr. 2. Human Factors and Ergonomics Society, S. 381–394

- EUROPEAN COMMISSION (2001): White Paper “European transport policy for 2010: time to decide“. – Technischer Bericht
- EUROPÄISCHE KOMMISSION (2006): eCall: Automatisches Notrufsystem für Autos. In: *EU-Nachrichten*, Nr. 47. Europäische Kommission - Vertretung in Deutschland
- FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION (2000): Introduction to TCAS II Version 7 / U.S. Department of Transportation. – Technischer Bericht
- FERRARA, A. (2004): Automatic pre-crash collision avoidance in cars. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, S. 133–138
- FITCH, Gregory M. ; KIEFER, Raymond J. ; HANKEY, Jonathan M. ; KLEINER, Brian M. (2007a): Toward Developing an Approach for Alerting Drivers to the Direction of a Crash Threat. In: *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* Bd. 49, Nr. 4. Human Factors and Ergonomics Society, S. 710–720
- FITCH, Gregory M. ; KIEFER, Raymond J. ; KLEINER, Brian M. ; HANKEY, Jonathan M. (2007b): Identifying the Pattern of Localization Responses with a Haptic Seat Intended to Alert Drivers to the Direction of a Crash Threat. In: *Human Factors and Ergonomics Society 51st Annual Meeting Proceedings, Surface Transportation*, S. 1517–1521
- FLEMISCH, Frank ; ADAMS, Catherine A. ; CONWAY, C Sheila R. ; PALMER, Michael T. ; SCHUTTE, Paul C. (2003): The H-Metaphor as a Guideline for Vehicle Automation and Interaction / NASA/TM-2003-212672. – Technischer Bericht
- FLEMISCH, Frank O. ; SCHOMERUSAND, Jan ; KELSCH, Johann ; SCHMUNTZSCH, Ulrike (2005): Vom Fahrer zum Reiter? Zwischenbericht 2005 auf dem Weg von der H-Metapher zum H-Mode für Bodenfahrzeuge. In: *VDI-Berichte Nr. 1919*
- FREYMAN, Raymond (2004): Möglichkeiten und Grenzen von Fahrerassistenz- und Aktiven Sicherheitssystemen. In: *Tagung “Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenzsysteme“*
- FRICKE, N. ; FILIPPIS, M. D. ; THÜRING, M. (2006): Zur Gestaltung der Semantik von Warnmeldungen. In: *VDI-Berichte Nr. 1960*, S. 133–148
- FUERSTENBERG, Kay (2006): Intersection Safety. In: *3rd International Workshop on Intelligent Transportation (WIT)*. Hamburg, Germany
- FUERSTENBERG, Kay ; HOPSTOCK, Matthias ; OBOJSKI, Andrzej ; RÖSSLER, Bernd ; CHEN, Jian ; DEUTSCHLE, Stefan ; BENSON, Chris ; WEINGART, Jürgen ; LARA, Alejandro China M. de (2007): INTERSAFE Deliverable 40.75 Final Report. Project Evaluation and Effectiveness of the Intersection Safety System. – Technischer Bericht
- GANDHI, T. ; TRIVEDI, M. M. (2005): Vehicle mounted wide FOV stereo for traffic and pedestrian detection. In: *Proc. IEEE International Conference on Image Processing ICIP 2005* Bd. 2, S. II–121–4
- GEISER, G. (1985): Mensch-Maschine-Kommunikation im Kraftfahrzeug. In: *Automobil-technische Zeitschrift (ATZ)*(87). GWV Fachverlage GmbH, S. 74–77



- GETTY, David J. ; SWETS, John A. ; PICKETT, Ronald M. ; GONTHIER, David (1995): System operator response to warnings of danger: A laboratory investigation of the effects of the predictive value of a warning on human response time. In: *Journal of Experimental Psychology: Applied* Bd. 1. American Psychological Association, S. 19–33
- GIJSSEL, Arno van ; BRUNNER, Genoveva ; KUENZNER, Hermann (2007): Assistance for the Sovereign Vehicle Driver – A Driver-Vehicle Interface for Sustained Situation Expectancy and Anticipative Vehicle Control. In: *VDI-Berichte Nr. 2015*, S. 251–256
- GRADENEGGER, Barbara ; SCHUMACHER, Markus ; SCHEUCHENPFLUG, Rainer ; KRÜGER, Hans-Peter (2006): Abschlussbericht PReVENT/AIDE: Untersuchung des Linksabbiegeassistenten, des Querverkehrsassistenten, des Ampelassistenten und des potentiellen Nutzens eines Workload-Management-Systems / Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften (Institute for Traffic Sciences). – Technischer Bericht
- GREENE, Leonard (1949): US Patent No. 2478967, Stall warning device for airplanes. – Technischer Bericht
- GUTBERLET, Karl-Walter (2008): Fahrerassistenzsysteme aus Sicht der Allianz und Einflüsse auf die Versicherungswirtschaft. In: *3. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz*. Garching b. München, Deutschland
- HELLIER, Elizabeth J. ; EDWORTHY, Judy ; DENNIS, Ian (1993): Improving Auditory Warning Design: Quantifying and Predicting the Effects of Different Warning Parameters on Perceived Urgency. In: *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* Bd. 35, Nr. 4. Human Factors and Ergonomics Society, S. 693–706
- HEWAGE, Kasun N. ; RUWANPURA, Janaka Y. (2004): Optimization of Traffic Signal Light Timing Using Simulation. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*
- HO, Cristy ; SPENCE, Charles (2005): Assessing the Effectiveness of Various Auditory Cues in Capturing a Driver's Visual Attention. In: *Journal of Experimental Psychology: Applied* Bd. 11. American Psychological Association, S. 157–174
- HOCHSCHULE OSTWESTFALEN-LIPPE (2008): *Heuer-Ampel, allgemeine Informationen*. – URL <http://www.hs-owl.de/fb3/labore/verkehrswesen/heuer-ampel-detmold/infos-zur-heuer-ampel.html> . – Zugriffsdatum: 07.10.2009
- HOFFMANN, G. (1989): Geschwindigkeitsempfehlungen im Kraftfahrzeug - Ein Beitrag zur Kraftstoffeinsparung durch das Informationssystem "Wolfsburger Welle". In: *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik* Bd. 5. Bundesminister für Verkehr, S. 161–166
- HUMMEL, Thomas ; KÜHN, Matthias (2007): Untersuchung zur Verfügbarkeit von ESP in Pkw 2007. In: *Unfallforschung kompakt*. Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V.
- ISO 15009 (2003): *Road vehicles – Ergonomic aspects of transport information and control systems – Specifications and compliance procedures for in-vehicle visual presentation*
- ISO 2575 (2000): *Road vehicles – Symbols for controls, indicators and tell-tales*

- JEX, H. R. (1988): The Critical Instability Tracking Task – Its Background, Development and Application. In: ROUSE, W. B. (Hrsg.): *Advances in Man Machine Systems Research* Bd. 5. Greenwich : Jai Press
- JIANG, Daniel ; DELGROSSI, Luca (2008): IEEE 802.11p: Towards an International Standard for Wireless Access in Vehicular Environments. In: *IEEE Vehicular Technology Conference*, S. 2036 – 2040
- KÜHN, Matthias ; FRÖMING, Robert ; SCHINDLER, Volker (2007): *Fußgängerschutz – Unfallgeschehen, Fahrzeuggestaltung, Testverfahren*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- KIDWAI, Farhan A. ; KARIM, Mohamed R. ; IBRAHIM, Mohd R. (2005): Traffic Flow Analysis of Digital Count Down Signalized Urban Intersection. In: *Eastern Asia Society for Transportation Studies*. Bangkok, Thailand, S. 1301–1308
- KLANNER, Felix (2008): *Entwicklung eines Kommunikationsbasierten Querverkehrsassistenten im Fahrzeug*, Technische Universität Darmstadt, Dissertation
- KLANNER, Felix ; THOMA, Stephan ; WINNER, Hermann (2008): Fahrerhaltensuntersuchungen und Mensch-Maschine-Interaktionskonzepte für die Kreuzungsassistenten. In: *3. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz*. Garching b. München, Deutschland
- KÖNIG, W. ; MUTSCHLER, H. (2003): ISO/TC22/SC13/WG8: Technical Report: MMI of warning systems in vehicles / ISO. – Technischer Bericht
- KUSSMANN, Holger ; MODLER, Holger ; BOLOVINOU, Anastasia ; AMDITIS, Angelos ; ROBERTSON, Patrick ; DEREGIBUS, Enrica ; ENGSTRÖM, Johan ; PIAMONTE, Paul ; PRINGLE, Andreas ; SCHOLLIERS, Johan ; FERON, Stephane ; KOMPFFNER, Paul ; COUVREUR, Christophe (2006): AIDE Deliverable D3.2.2: System Architecture, data flow protocol definition / AIDE Consortium. – Technischer Bericht
- LANGE, C. ; WOHLFARTER, M. ; BUBB, H. (2008): Development and Testing of Icons for Driver Assistance Systems. In: *Proceedings 2nd International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*. Las Vegas, USA
- LANGE, C. ; YOO, J.-W. ; WOHLFARTER, M. ; BUBB, H. (2006): Dikablis – Operation mode and evaluation of the human-machine interaction. In: *Spring Conference of Ergonomics Society of Korea*. Seoul
- LANGE, Christian ; TÖNNIS, Marcus ; BUBB, Heiner ; KLINKER, Gudrun (2006): Einfluss eines aktiven Gaspedals auf Akzeptanz, Blickverhalten und Fahrperformance. In: *VDI-Berichte Nr. 1960*
- LERMER, Ramona ; SCHUHMANN, Josef (2007): Warn- und Informationsmanagement (WIM) im PKW: Zeitkritikalität, Fahrerleistung, Fahrsituation. In: *AAET 2007, Automatisierungs-, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*, S. 198–214

- LEXUS-EUROPE (2008): *LEXUS - LS - Lane Keeping Assist*. – URL <http://www.lexus.eu/range/Ls/key-features/safety/safety-lane-keeping-assist.aspx> . – Zugriffsdatum: 07.10.2009
- LINDBERG, Thomas ; SCHALLER, Thomas ; GRADENEGGER, Barbara (2007): Stauassistentz – Unterstützung des Fahrers durch Übernahme der Quer- und Längsführung im Stau. Hoch automatisiertes Fahren in Stop&Go- und Stausituationen. In: *VDI-Berichte Nr. 2015*, S. 39–42
- LINDBERG, Thomas ; TÖNERT, Lars ; BENGLER, Klaus-Josef (2009): Integration von aktiven Sicherheitssystemen für die Querführung. In: *Der Fahrer im 21. Jahrhundert, VDI-Bericht Nr. 2085*. Düsseldorf
- LÖPER, Christian ; SCHOMERUS, Jan ; BRANDT, Thorsten ; FLEMISCH, Frank ; SATTEL, Thomas (2006): Bahnplanung, Bahnführung und haptische Interaktion für ein Fahrerassistenzsystem zur Querführung. In: *VDI-Berichte Nr. 1960*
- MARSHALL, Dawn C. ; LEE, John D. ; AUSTRIA, P. A. (2007): Alerts for In-Vehicle Information Systems: Annoyance, Urgency, and Appropriateness. In: *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* Bd. 49. Human Factors and Ergonomics Society, S. 145–157(13)
- MATHEUS, Kirsten ; MORICH, Rolf ; LÜBKE, Andreas (2004): Economic Background of Car-to-Car Communication. In: *IMA 2004 - Informationssysteme für mobile Anwendungen, 2. Braunschweiger Symposium*
- MATTES, S. (2003): The Lane Change Task as a Tool for Driver Distraction Evaluation. In: STRASSER, H. (Hrsg.) ; RAUSCH, H. (Hrsg.) ; BUBB, H. (Hrsg.): *Quality of Work and Products in Enterprises of the Future*. Stuttgart : Ergonomia Verlag
- MCANALLY, Ken I. ; MARTIN, Russell L. (2007): Spatial Audio Displays Improve the Detection of Target Messages in a Continuous Monitoring Task. In: *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* Bd. 49, Nr. 4. Human Factors and Ergonomics Society, S. 688–695
- MEITINGER, K.-H. ; EHMANN, D. ; HEISSING, B. (2004): Systematische Top-Down-Entwicklung von Kreuzungsassistenzsystemen. Beispiel Stop-Schild-Warnung. In: *VDI/VW Gemeinschaftstagung Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme*. Wolfsburg
- MEITINGER, Karl-Heinz ; HEISSING, Bernard ; EHMANN, Dirk (2006): Linksabbiegeassistentz (Beispiel für die Top-Down-Entwicklung eines Aktiven Sicherheitssystems). In: *Tagung "Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenzsysteme"*
- MELLINGHOFF, Ulrich ; BREITLING, Thomas ; SCHÖNEBURG, Rodolfo ; METZLER, Hans-Georg (2009): The Mercedes-Benz Experimental Safety Vehicle 2009. In: *21st International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles*. Stuttgart

- MISENER, James A. ; SENGUPTA, Raja (2005): Cooperative Collision Warning: Enabling Crash Avoidance with Wireless Technology. In: *6th European Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services (ITS)*. San Francisco, USA
- MUIGG, Andreas ; MEURLE, Jürgen ; RIGOLL, Gerhard (2008): Negative Auswirkungen von situativ ungünstigen Meldungen. In: *3. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz*. Garching b. München, Deutschland
- NICKO, Oliver (2009): *Informationsgehalt akustischer Warnungen im Automobil*, Technische Universität Dresden, Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften, Fachrichtung Psychologie, Diplomarbeit
- NITZ, Gregor ; ZAHN, Peter (2008): Nutzergerechte Eingriffstrategien für ein aktives Gefahrenbremssystem. In: *17. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik*, S. 1593–1608
- NORDDEUTSCHER RUNDFUNK (2007): *Aus für Hamburger Restzeit-Ampeln*. – URL <http://www1.ndr.de/nachrichten/hamburg/restzeitampeln2.html> . – Zugriffsdatum: 15.11.2008
- OLIVEIRA, Denise de ; BAZZAN, Ana L. C. ; SILVA, Bruno C. da ; BASSO, Eduardo W. ; NUNES, Luis ; ROSSETTI, Rosaldo ; OLIVEIRA, Eugénio de ; SILVA, Roberto da ; A, Luis L. (2006): Reinforcement Learning based Control of Traffic Lights in Non-stationary Environments: A Case Study in a Microscopic Simulator. In: *EUMAS'06, Fourth European Workshop on Multi-Agent Systems*
- PALEKAR, Trishul A. (2006): *Signal Optimization at Isolated Intersections Using Pre-Signals*, Texas A&M University, Diplomarbeit
- PALMQUIST, U. (1993): Intelligent cruise control and roadside information. 13 (1993), Feb., Nr. 1, S. 20–28
- PARASURAMAN, R. ; MOLLOY, R. ; SINGH, I. L. (1993): Performance consequences of automation-induced “complacency“. In: *The International Journal of Aviation Psychology*, S. 1–23
- PARASURAMAN, Raja ; RILEY, Victor (1997): Humans and Automation: Use, Misuse, Disuse, Abuse. In: *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* Bd. 39, Nr. 2. Human Factors and Ergonomics Society, S. 230–253
- PASENAU, Thimo ; SAUER, Thomas ; EBELING, Jörg (2007): Aktive Geschwindigkeitsregelung mit Stop&Go-Funktion im BMW 5er und 6er. In: *Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ)* Bd. 10. GWV Fachverlage GmbH, S. 900–908
- PASHLER, Harold (1992): Attentional Limitations in Doing Two Tasks at the Same Time. In: *Current Directions in Psychological Science* Bd. 2, Nr. 1. Cambridge University Press

- PERRY, Nathan C. ; STEVENS ; J, Catherine ; WIGGINS, Mark W. ; HOWELL, Clare E. (2007): Cough Once for Danger: Icons Versus Abstract Warnings as Informative Alerts in Civil Aviation. In: *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* Bd. 49, Nr. 6. Human Factors and Ergonomics Society, S. 1061–1071
- PLAVŠIĆ, Marina ; BUBB, Heiner ; DUSCHL, Markus ; TÖNNIS, Marcus ; KLINKER, Gudrun (2009): Ergonomic Design and Evaluation of Augmented Reality Based Cautionary Warnings for Driving Assistance in Urban Environments. In: *17th World Congress on Ergonomics*. Beijing, China
- POPIV, D. ; RAKIC, M. ; BENGLER, K. ; BUBB, H. (2008): Naturalistic Driving Study on Approaching and Lane-Changing Behavior. In: *2nd International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*. Las Vegas
- PÖPPEL, Ernst (2002): Informationsverarbeitung im menschlichen Gehirn. In: *Informatik-Spektrum* Bd. 16. Gesellschaft für Informatik, S. 427–437
- PRITCHETT, Amy R. ; HANSMAN, R. J. (1997): Pilot Non-Conformance to Alerting System Commands. In: *Ninth International Symposium on Aviation Psychology*
- RASMUSSEN, J. (1983): Skills, rules, knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. In: *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* Bd. 13. IEEE, S. 257–266.
- RAT DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN (1977): *Richtlinie 78/316/EWG des Rates vom 21. Dezember 1977 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Innenausstattung der Kraftfahrzeuge (Kennzeichnung der Betätigungseinrichtungen, Kontrolleuchten und Anzeiger)*. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft
- REICHART, Günter (2000): *Menschliche Zuverlässigkeit beim Führen von Kraftfahrzeugen*, TU München, Lehrstuhl für Ergonomie, Dissertation
- RICHTER, Andreas (2005): *Geschwindigkeitsvorgabe an Lichtsignalanlagen - Technische Aspekte und volkswirtschaftlicher Nutzen*, Helmut Schmidt Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg, Dissertation
- ROCKWELL COLLINS (2008): *Rockwell Collins EICAS-5000 System*. – URL <http://www.rockwellcollins.com/products/cs/br/avionics-systems/eicas/eicas/> . – Zugriffsdatum: 07.10.2009
- RÖSSLER, Bernd ; FUERSTENBERG, Kay (2007): Intersection Safety: Results of The EC-Project INTERSAFE. In: *6th European Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services (ITS)*. Aalborg, Denmark
- RUDIN-BROWN, Chstina M. ; PARKER, Heather A. ; MALISIA, Alice R. (2003): Behavioral Adaptation to Adaptive Cruise Control. In: *Proceedings of The Human Factors And Ergonomics Society 47th Annual Meeting*
- SATO, Akihiko ; KITAHARA, Itaru ; KAMEDA, Yoshinari ; OHTA, Yuichi (2006): Visual navigation system on windshield head-up display. In: *ITS World Congress*. London

- SCHIEBEN, Anna ; DAMBÖCK, Dainiel ; KELSCH, Johann ; RAUSCH, Herbert ; FLEMISCH, Frank (2008): Haptisches Feedback im Spektrum von Fahrerassistenz und Automation. In: *3. Tagung "Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz"*. Garching b. München, Deutschland
- SCHULZ, Roland (2005): Automotive Laserscanner for ADAS Applications on Trucks. In: *12th World Congress on Intelligent Transport Systems and Services (ITS)*. San Francisco, USA
- SCHWARZ, Daniel (2007): Pedestrian Protection Systems using Cooperative Sensor Technology. In: *11th International Forum on Advanced Microsystems for Automotive Applications (AMAA)*. Berlin, Germany
- SCHWARZ, Daniel ; RASSHOFER, Ralph (2007): Fußgängerschutz mit kooperativer Sensorik - Anforderungen an Trackingalgorithmen. In: *Technische Akademie Heilbronn e.V., 2. Fachforum Kraftfahrzeugtechnik*
- SCHWARZ, Juergen (2006): RESPONSE 3: Code of Practice for the Design and Evaluation of ADAS. URL [http://www.prevent-ip.org/download/deliverables/RESPONSE3/D11.2/Response3\\_CoP\\_v3.0.pdf](http://www.prevent-ip.org/download/deliverables/RESPONSE3/D11.2/Response3_CoP_v3.0.pdf) . – Technischer Bericht
- SENSOMOTORIC INSTRUMENTS GMBH (2004): *InSight Eye Tracking System*. – URL <http://www.smivision.com> . – Zugriffsdatum: 06.11.2008
- STAHL, Thomas ; VÖLTER, Markus ; EFFTINGE, Sven ; HAASE, Arno (2007): *Modellgetriebene Softwareentwicklung: Techniken, Engineering, Management*. Dpunkt Verlag
- STATISTISCHES BUNDESAMT (2008): Verkehr, Verkehrsunfälle. In: *DeStatis, Fachserie 8, Reihe 7*. Statistisches Bundesamt
- STROBL, Martin H. (2003): SPIDER – Das innovative Software-Framework der BMW Fahrsimulation. In: *VDI Berichte*
- TAYA, Fumihito ; KAMEDA, Yoshinari ; OHTA, Yuichi (2005): NaviView: Virtual Slope Visualization of Blind Area at an Intersection. In: *12th World Congress on Intelligent Transport Systems and Services (ITS)*. San Francisco, USA
- TEPLY, S. ; SCHNABLEGER, J. (1990): Variable speed advisory signals for linking coordinated systems in Canada. In: *Proc. Third International Conference on Road Traffic Control*, S. 90–94
- THEOFANOU, Dimitra (2002): *Maße zur Erfassung von visueller Ablenkung bei verschiedenen komplexen Streckenabschnitten*, Universität Regensburg, Dissertation
- THOMA, Stephan ; LINDBERG, Thomas ; KLINKER, Gudrun (2007): Speed recommendations during traffic light approach: a comparison of different display concepts. In: WAARD, Dick de (Hrsg.) ; FLEMISCH, Frank (Hrsg.) ; LORENZ, Bernd (Hrsg.) ; OBERHEID, Hendrik (Hrsg.) ; BROOKHUIS, Karel (Hrsg.): *Human Factors and Ergonomics Society Europe Chapter, Annual Meeting*. Soesterberg, The Netherlands

- THOMA, Stephan ; LINDBERG, Thomas ; KLINKER, Gudrun (2008a): Gestaltung von Geschwindigkeitsempfehlungen während der Annäherung an eine Ampel. In: *54. Frühjahrskongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.*
- THOMA, Stephan ; LINDBERG, Thomas ; KLINKER, Gudrun (2008b): Evaluation of a generic warning for multiple intersection assistance systems. In: *Human Factors and Ergonomics Society Europe Chapter, Annual Meeting*. Soesterberg, The Netherlands
- TÖNNIS, Marcus ; KLINKER, Gudrun (2006): Effective control of a car driver's attention for visual and acoustic guidance towards the direction of imminent dangers. In: *Proc. IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality ISMAR 2006*, S. 13–22
- TÖNNIS, Marcus ; LANGE, Christian ; KLINKER, Gudrun ; BUBB, Heiner (2006): Transfer von Flugschlauchanzeigen in das Head-Up Display von Kraftfahrzeugen. In: *VDI-Berichte Nr. 1960*
- TOAKA, G. T. (1990): Duration of Drivers' Glances at Mirrors and Displays. In: *ITE Journal*, S. 35–39
- TRAYFORD, R. ; DOUGHTY, B. ; TOUW, J. van der (1987): Ein Straßenexperiment zur Erprobung der dynamischen Anweisung von Richtgeschwindigkeiten unter einem verkehrsabhängigen Signalsteuersystem in Australien. In: *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik* Bd. 6. Bundesminister für Verkehr, S. 218–221
- TROPSCHUH, Peter F. ; REMLINGER, Wolfram (2001): Die veränderte Rolle des Fahrers im Automobil der Zukunft. In: *4. Stuttgarter Symposium*. Bargende/Wiedemann (Hrsg.), expert-Verlag 2001, S. 719–732
- VERVERS, Patricia M. ; DORNEICH, Michael C. ; GOOD, Michael D. ; DOWNS, Joshua L. (2002): Integrating Critical Information on Flight Deck Displays. In: *Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings, Aerospace Systems*, Human Factors and Ergonomics Society, S. 11–15
- VOLKSWAGEN (2006): INVENT: Schlussbericht FAS / Volkswagen AG. – Technischer Bericht
- VOY, Christian ; ZIMDAHL, Walter ; MAINKA, Wolfgang (1983): Einrichtung zur Verkehrsführung nach dem Prinzip der grünen Welle / Volkswagen AG (DE3126481A1). – Deutsches Patent
- VUKOTICH, Alejandro ; POPKEN, Markus ; ROSENOW, Andrej ; LÜBCKE, Michael (2008): Fahrerassistenzsysteme. In: *Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), ATZextra Audi Q5*. GWV Fachverlage GmbH, S. 170–177
- WALESSA, Marc (2006): COMPOSE Deliverable D51.11 Final Report / PReVENT Consortium. – Technischer Bericht

- WALZER, P. ; ZIMDAHL, Walter (1988): European Concepts For Vehicle Safety, Communication And Guidance. In: *International Congress on Transportation Electronics Convergence* Bd. 88, S. 91 – 95
- WANDKE, H. (2005): Assistance in human-machine interaction: a conceptual framework and a proposal for a taxonomy. In: *Theoretical Issues in Ergonomics Science* Bd. 2, Nr. 6. Taylor & Francis, S. 129–155
- WELFORD, A.T. (1952): The „psychological refractory period“ and the timing of high speed performance — A review and a theory. In: *British Journal of Psychology* Bd. 43, S. 2–19
- WELT ONLINE (2005): *Revolution auf Hamburgs Straßen*. – URL [http://www.welt.de/print-wams/article131222/Revolution\\_auf\\_Hamburgs\\_Strassen.html](http://www.welt.de/print-wams/article131222/Revolution_auf_Hamburgs_Strassen.html) . – Zugriffsdatum: 07.10.2009
- WELT ONLINE (2007): *Behörde stoppt Countdown-Ampeln*. – URL [http://www.welt.de/hamburg/article1149789/Behoerde\\_stoppt\\_Countdown\\_Ampeln.html](http://www.welt.de/hamburg/article1149789/Behoerde_stoppt_Countdown_Ampeln.html) . – Zugriffsdatum: 07.10.2009
- WICKENS, Christopher D. (1980): The structure of attentional resources. In: NICKERSON, R. (Hrsg.): *Attention and performance VIII*. Erlbaum, S. 239–257
- WICKENS, Christopher D. ; HOLLANDS, Justin G. (1992): *Engineering Psychology and Human Performance, Second Edition*. Addison Wesley
- WILLIAMS, Elena M. (2007): *Analyse des Fahrverhaltens in ausgewählten innerstädtischen Kreuzungssituationen*, Technische Universität Darmstadt, Dissertation
- WOLF, H. ; ZÖLLNER, R. ; BUBB, H. (2005): Ergonomische Aspekte der Mensch-Maschine-Interaktion bei gleichzeitig agierenden Fahrerassistenzsystemen. In: *Zeitschrift für Verkehrssicherheit* Bd. 3. TÜV Media GmbH, S. 119–124
- YOO, Herbert ; TSIMHONI, Omer ; WATANABE, Hiroshi ; GREEN, Paul ; SHAH, Raina (1999): Display of HUD Warnings to Drivers: Determining an Optimal Location / University of Michigan Transportation Research Institute (UMTRI). – Technischer Bericht
- ZIMDAHL, Walter (1984): Guidelines and some developments for a new modular driver information system. In: *34th IEEE Conference on Vehicular Technology* Bd. 34, S. 178 – 182