

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN  
Lehrstuhl für Ergonomie

**Entwicklung und Bewertung aufmerk-  
samkeitslenkender Warn- und Informations-  
konzepte für Fahrerassistenzsysteme**

Aufmerksamkeitssteuerung in der frühen Phase  
kritischer Verkehrssituationen

Lutz Martin Lorenz

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Univer-  
sität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

vorgelegten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Florian Holzapfel

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr. phil. Klaus Bengler
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Matthias Rötting  
Technische Universität Berlin

Die Dissertation wurde am 11.06.2013 bei der Technischen Universität München eingereicht  
und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 19.03.2014 angenommen.



## Zusammenfassung

Eine Vermeidung von Unfällen durch Fahrerassistenzsysteme setzt geeignete Interaktionskonzepte zwischen dem Fahrer und dem Assistenzsystem voraus. Die Frage, wie der Fahrer bereits in der frühen Phase einer kritischen Verkehrssituation durch geeignete Warn- und Informationskonzepte unterstützt werden kann, stellt den Schwerpunkt dieser Arbeit dar. Der Fokus liegt hierbei auf Verkehrssituationen, in denen der Fahrer mit hoher Wahrscheinlichkeit handlungsrelevante Informationen gar nicht oder zu spät wahrnimmt. Hierfür wird ein neuartiges Verfahren vorgestellt, mit dem Blickabwendungen vom Fahrgeschehen in Echtzeit geschätzt werden können, um hierdurch Warnausgaben an den Aufmerksamkeitszustand des Fahrers anzupassen. Darauf aufbauend werden neuartige Warn- und Informationskonzepte für eine Auffahr- und Spurwechselwarnung entwickelt, die eine schnelle Ausrichtung der Aufmerksamkeit auf die Gefahr bewirken. Hierfür wird erstmals im automobilen Kontext das Prinzip einer stroboskopischen Bewegungsanimation und akustischen Reflexion zur Beeinflussung der Aufmerksamkeitsausrichtung vorgestellt. In Fahrersimulatorstudien wird gezeigt, dass die Bewegungsanimation kürzere Bremsreaktionszeiten verursacht und die akustische Reflexion zu weniger Kollisionen mit Fahrzeugen im toten Winkel führt.

### **Schlüsselwörter:**

Fahrerassistenzsysteme, Mensch-Maschine-Interaktion, Warn- und Informationskonzepte

## Abstract

Advanced driver assistance systems support the driver in certain traffic situations and increase road safety. For this appropriate interaction concepts between the driver and the assistance system are required. Thus this work deals with the question of how warn and information concepts support a driver in an early stage of critical traffic situations. The focus is on traffic situations in which the driver most likely does not perceive important informations. Therefore this thesis presents a new procedure on estimating visual distraction in real time so warnings can be adjusted to the attention condition of the driver. In order to reduce the risk of accidents new warn and information concepts are developed by which the driver's attention will be drawn as quickly as possible to the hazard. To draw drivers attention the principle of a stroboscopic animation and an acoustic reflection is introduced into the automotive context for the first time. The effectiveness of these concepts is proved in driving simulator experiments.

### **Keywords:**

Advanced Driver Assistance Systems, Human-Machine-Interface, warnings and informations



---

## Danksagung

---

Fast vier Jahre habe ich an dieser Dissertation gearbeitet. In dieser Zeit haben mich viele Menschen begleitet, bei denen ich mich recht herzlich bedanken möchte!

Zuerst danke ich Prof. Dr. Klaus Bengler für die Betreuung dieser Arbeit. Trotz seines stets vollen Terminkalenders waren regelmäßige Rücksprachen möglich. Die Diskussionen mit ihm haben sehr viel Spaß gemacht und mir sehr geholfen. Vor allem in der Anfangsphase hat er mir den entscheidenden „Schubser“ in die richtige Richtung gegeben. Prof. Dr. Matthias Rötting danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Weiter danke ich Dr. Thomas Lindberg für die Förderung und Betreuung meiner Arbeit bei BMW. Bereits als Praktikant habe ich viel von ihm gezeigt bekommen und dementsprechend viel gelernt. (Dr.) Stephan Müller danke ich, da er die Betreuung meiner Arbeit nach dem Abteilungswechsel von Dr. Thomas Lindberg übernahm. Die mit ihm entwickelten High-Tech Versuchsaufbauten im U-Lab bleiben unvergessen. Ein besonderer Dank gilt allen Kollegen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Es hat Spaß gemacht mit euch gemeinsam zu diskutieren, zu streiten und zu lachen. Die „schwiiiiieerig“-Diskussionen mit Dr. P. Frederik Platten haben das Niveau dieser Arbeit aus psychologischer Sicht deutlich angehoben. Dr. Wolfgang Spiessl danke ich für die ZIO, Floris und Flash Starthilfen. Meinen Studenten (Dr.) Nicole Kühnpast, Thomasz Bogunowicz, Julia Hirzel und Sebastian Hergeth danke ich für ihr Engagement und ihre Sorgfalt. Meinen Kollegen Dr. Philipp Reinisch, (Dr.) Mehdi Farid, Dr. Roman Vilimek, Marion Mangold, Svenja Paradies, Martin Stobl, Toni Haslbeck, Stefan Hofmann und (Dr.) Michael Brandstätter danke ich für das freundschaftliche Arbeitsklima und ihre Unterstützung bei meinen Fahrsimulatorversuchen. Danke auch an die vielen Korrekturleser Julia Niemann, (Dr.) Nicole Kühnpast, Dr. P. Frederik Platten und Dr. Moritz Werling.

Zuletzt danke ich meiner Familie, meinen Eltern Vera und Hartmut sowie meinen Geschwistern Jan und Karsta für die grenzenlose Unterstützung und den nötigen Rückhalt.

München, Mai 2014

Lutz Lorenz



*Für Vera und Hartmut*





---

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>Abkürzungen und Formelzeichen</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Potential der Fahrzeugsicherheit . . . . .	2
1.2 Stand der Technik . . . . .	3
1.3 Problemstellung und Ziele der Arbeit . . . . .	4
<b>2 Grundlagen</b>	<b>9</b>
2.1 Der Autofahrer und seine Interaktion mit Fahrerassistenzsystemen . . . . .	10
2.1.1 Systematisierung der Fahraufgabe . . . . .	10
2.1.2 Der Fahrerzustand . . . . .	12
2.1.3 Das Fahrerverhalten . . . . .	13
2.2 Grundlagen der Informationsverarbeitung . . . . .	15
2.2.1 Modelle zur Informationsverarbeitung . . . . .	15
2.2.2 Modelle zur Reaktionszeit . . . . .	17
2.2.3 Der Begriff Aufmerksamkeit . . . . .	18
2.2.4 Das Konstrukt Situationsbewusstsein . . . . .	19
2.3 Grundlagen der Wahrnehmungspsychologie . . . . .	20
2.3.1 Visuelle Wahrnehmung . . . . .	20
2.3.2 Auditiv Wahrnehmung . . . . .	22
2.4 Zusammenfassung . . . . .	24
<b>3 Ableitung der Anforderungen an Warn- und Informationskonzepte</b>	<b>27</b>
3.1 Systematisierung von Fahrerassistenzsystemen . . . . .	27
3.2 Ausgabekanäle von Fahrerassistenzsystemen . . . . .	29
3.2.1 Optische Ausgabetechnologien . . . . .	29
3.2.2 Akustische Ausgabetechnologien . . . . .	30

3.3	Gestaltung von Assistenz . . . . .	31
3.3.1	Gestaltungsaspekte . . . . .	31
3.3.2	Gestaltungsziele . . . . .	33
3.4	Warn- und Informationsstrategien . . . . .	35
3.4.1	Kenngrößen zur Situationsinterpretation . . . . .	36
3.4.2	Eskalationsstrategien . . . . .	36
3.5	Schwächen der Mensch-Maschine-Schnittstelle aktueller Assistenzsysteme . . . . .	38
3.5.1	Anforderungen an Warnkonzepte für die Längsführung . . . . .	38
3.5.2	Anforderungen an Informationskonzepte für die Querführung . . . . .	40
3.6	Zusammenfassung . . . . .	41
<b>4</b>	<b>Neuartige Verfahren zur Erfassung des Fahrerzustands</b>	<b>43</b>
4.1	Grundlagen der Modellentwicklung . . . . .	44
4.1.1	Klassifikationsverfahren . . . . .	45
4.1.2	Bewertung von Klassifikatoren . . . . .	46
4.2	Entwicklung eines Fahrerzustandsmodells . . . . .	48
4.2.1	Datensatzgenerierung . . . . .	48
4.2.2	Datensatzanalyse . . . . .	51
4.2.3	Ableiten von Zwischengrößen . . . . .	53
4.2.4	A-priori Modellierung . . . . .	55
4.2.5	Heuristische Modellierung . . . . .	57
4.2.6	Evaluierung der Modelle . . . . .	60
4.3	Zusammenfassung und Diskussion . . . . .	62
<b>5</b>	<b>Entwicklung von Warnkonzepten für die Längsführung</b>	<b>65</b>
5.1	Entwicklung fahrerabhängiger Warnstrategien . . . . .	65
5.1.1	Warnstrategie „Periphere Blickführung“ . . . . .	66
5.1.2	Warnstrategie „Animierte Blickführung“ . . . . .	67
5.2	Fragestellungen und Hypothesengenerierung . . . . .	67
5.2.1	Blickverhalten . . . . .	68
5.2.2	Fahrverhalten . . . . .	68
5.2.3	Subjektive Bewertung . . . . .	69
5.3	Bewertungsmethodik . . . . .	69
5.3.1	Technische Umsetzung . . . . .	70
5.3.2	Operationalisierung . . . . .	71
5.3.3	Versuchsdesign . . . . .	73
5.3.4	Stichprobe und Ausschlusskriterien . . . . .	74
5.3.5	Ergebnisse . . . . .	75
5.4	Zusammenfassung und Diskussion . . . . .	81
<b>6</b>	<b>Entwicklung von Informationskonzepten für die Querführung</b>	<b>85</b>
6.1	Handlungsphasen bei Fahrstreifenwechsel . . . . .	85
6.2	Informationskonzepte zur Unterstützung des Fahrers bei Fahrstreifenwechsel . . . . .	86
6.3	Fragestellungen und Hypothesengenerierung . . . . .	89
6.3.1	Blickverhalten . . . . .	89

6.3.2	Fahrverhalten . . . . .	90
6.3.3	Subjektive Bewertung . . . . .	91
6.4	Exkurs: Auditive Wahrnehmbarkeit von vorbeifahrenden Fahrzeugen . . . .	92
6.5	Bewertungsmethodik . . . . .	95
6.5.1	Technische Umsetzung . . . . .	95
6.5.2	Operationalisierung . . . . .	99
6.5.3	Versuchsdesign . . . . .	101
6.5.4	Stichprobe und Ausschlusskriterien . . . . .	104
6.5.5	Ergebnisse Teil a – Realsituation . . . . .	105
6.5.6	Ergebnisse Teil b – Totwinkelsituationen . . . . .	112
6.6	Zusammenfassung und Diskussion . . . . .	114
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>117</b>
	<b>Anhang</b>	<b>121</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>141</b>



---

# Abkürzungen und Formelzeichen

---

## Abkürzungen

---

Abkürzung	Bedeutung
ABS	Antiblockiersystem
ACC	Adaptive Cruise Control
ADAS	Advanced Driver Assistance Systems
AGB	Autonome Gefahrenbremsung
AOI	Area Of Interest
AR	Augmented Reality
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
CAN	Controller Area Network
CART	Classification And Regression Trees
CHAID	Chi-square Automatic Interaction Detectors
CID	Central Information Display
DIN	Deutsche Industrie Norm
EB	Entscheidungsbäume
E/E	Elektrik/Elektronik
EEG	Elektroenzephalographie
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
EU	Europäische Union
FAS	Fahrerassistenzsysteme
FPS	frames per seconds
GAZ	Gaspedal-Aktivzeit
GND	Ground
HFC	High Frequency Components
HIFI	high fidelity

HMI	Human-Machine-Interface
HMM	Hidden-Markov-Modelle
HRTF	Head-Related-Transfer-Functions
HUD	Head-Up Display
IT	Informationstechnologie
KI	Kombiinstrument
LCD	Liquid-Crystal-Display
LED	Light-emitting diode
LP	Laterale Spurposition
MLP	Mean Lateral Position
MMI	Mensch-Maschine-Interaktion / Man-Machine-Interface
MMS	Mensch-Maschine-Schnittstelle / Mensch-Maschine-System
NA	Nebenaufgabe
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration
NN	Neuronale Netze
OODA	Observe, Orient, Decide, Act
PDC	Park Distance Control
PRC	Percent Road Center
RADAR	radio detection and ranging
RM	Regressionsmodelle
SAR	Steering Action Rate
SCR	skin conductance response
SDLP	Standard Deviation Lateral Position
SPL	Sound Pressure Level
SRR	Steering Reversal Rate
SVM	Support Vektor Maschinen
SWF	Spurwechsel-Fortschrittsgrad
TFT	Thin-Film-Transistor
TLC	time to line crossing
TTC	time to collision
VP	Versuchsperson

---

**Abkürzungen für Einheiten:**

---

km	Kilometer
m	Meter
ms	Millisekunden
n	Anzahl
s	Sekunden
-	Keine Einheit
V	Volt
$\Omega$	Ohm

---

# Formelzeichen

## Symbole

Symbol	Bedeutung	Einheit
$a_{ZielFzg}$	Beschleunigung des Zielfahrzeugs	m/s <sup>2</sup>
$c$	Schallgeschwindigkeit	m/s
$d$	Abstand	m
$d_{KK}$	Abstand Schallquelle zum Kunst- kopf	m
$d_{Re}$	Abstand Schallquelle zur Reflexions- wand	m
$L$	Lautstärkepegel	phon
$L_p$	Schalldruckpegel	dB
$N$	Lautheit	sones
$n_{AOI}$	Blickanzahl im entsprechenden AOI	n
$t_{AOI}$	Blickdauer im entsprechenden AOI	s
$n_{Längsregulation}$	Anzahl der Brems- und Beschleuni- gungsmanöver	n
$n_{Kollision}$	Anzahl der Kollisionen	n
$P_{band}$	Sensitives Frequenzband des Lenksi- gnals	°
$p_{Brems}$	Bremsdruck	%
$p_{Bremsmax}$	Maximaler Bremsdruck	%
$P_{gesamt}$	Gesamtlenksignal	°
$r$	Abstand zur Schallquelle	m
$R_v$	Vorwiderstand	Ω
$S_{Drehpause}$	Schwellwert für die Drehpause	s
$S_{Drückpause}$	Schwellwert für die Drückpause	s
$t$	Zeit	s oder ms
$t_{Blickreaktion}$	Zeit bis Blick das CID verlässt	s
$t_{Blickzuwendung}$	Zeit bis Blick auf Zielfahrzeug ist	s
$t_{Bremsreaktion}$	Zeit bis Bremspedalbetätigung	s
$t_{Bremsmax}$	Zeit bis maximaler Bremsdruck an- liegt	s
$t_{Drehpause}$	Zeit der Drehpause am Dreh-Drück- Steller	s
$t_{Drückpause}$	Zeit der Drückpause am Dreh- Drück-Steller	s
$t_{GAZ}$	Gaspedal-Aktivzeit	s
$t_{Gesamt}$	Dauer des gesamten Spurwechsel- manövers	s
$t_{Handlung}$	Dauer der Handlungsphase	s

## Abkürzungen und Formelzeichen

---

$t_{L\ddot{a}ngsregulation}$	Zeit bis zur Änderung der Längsführung	s
$t_{Orient}$	Dauer der Orientierungsphase	s
$t_{SpellerDauer}$	Dauer der Navigationsaufgabe	s
$t_{Umsetz}$	Zeit der Umsetzbewegung des Fußes vom Gas- aufs Bremspedal	s
$v$	Geschwindigkeit	m/s
$y$	Laterale Abstand zur Fahrstreifenmarkierung	m
$\delta$	Lenkwinkel	°
$\gamma$	Gaspedalstellung	%

---



# KAPITEL 1

---

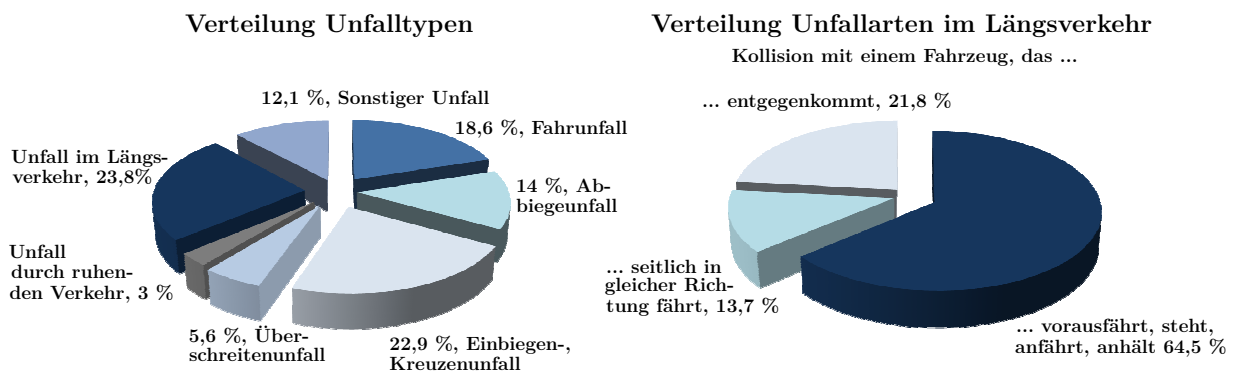
## Einleitung

---

Ein modernes Kraftfahrzeug der Fahrzeugoberklasse ist heutzutage ohne moderne Fahrerassistenzsysteme (FAS) undenkbar. So hat seit den neunziger Jahren die Anzahl der Elektrik/Elektronik (E/E) Komponenten stark zugenommen. Ohne diese Zunahme an Elektronik und IT (Informationstechnik) wären zahlreiche Innovationen aus dem Bereich der aktiven und passiven Sicherheit unmöglich gewesen [177]. Passive Sicherheitssysteme mildern die Folgen von Unfällen, setzen also erst ein, wenn ein Unfall unvermeidlich ist oder eine Kollision bereits stattgefunden hat. Bekannte Beispiele hierfür sind der Sicherheitsgurt oder Airbag. Aktive Sicherheitssysteme hingegen zeichnen sich durch ein früheres Einschreiten bei Gefahr aus, so dass es erst gar nicht zu einem folgenschweren Unfall kommt [20]. Neben bereits etablierten Systemen, wie dem abstandsgeregelten Tempomat Adaptive Cruise Control (ACC) oder der Auffahr-, Spurwechsel- und Spurverlassenswarnung, wird es künftig Systeme wie den Kreuzungsassistenten oder die Querführungsunterstützung geben [130]. Der Zenit der Fahrerassistenzentwicklung ist somit noch lange nicht erreicht. Neben immer leistungsfähigeren Umfeldsensoren wird in Zukunft die Vernetzung von Fahrzeugen untereinander eine große Rolle spielen. Das High-Tech-Fahrzeug von morgen wird mehr „sehen“ und „denken“ [174]. Eine Herausforderung wird daher sein, aus den zahlreichen Umfeldinformationen geeignete Warn- und Informationsstrategien zu entwickeln, die den Fahrer bei Gefahr optimal unterstützen. Demnach sollen Warn- und Informationsausgaben von Fahrerassistenzsystemen schnelle und richtige Handlungen des Fahrers bewirken, die ihn vor oder in kritischen Verkehrssituationen bewahren bzw. ihm assistieren.

## 1.1 Potential der Fahrzeugsicherheit

Insgesamt 4.009 Tote und 392.365 Verletzte (davon 68.985 Schwerverletzte) wurden im Straßenverkehr 2011 vom Statistischen Bundesamt erfasst [53]. Hiervon waren die meisten Unfälle Kollisionen mit anderen Verkehrsteilnehmern, die sich in gleicher oder entgegengesetzter Richtung bewegten (siehe Unfalltyp „Unfall im Längsverkehr“ in Abb. 1.1 links). Eine weitere Unterteilung der Unfälle im Längsverkehr nach Art der Bewegungsrichtung der beteiligten Fahrzeuge zueinander ergab, dass Unfälle mit einem Fahrzeug, das vorausfährt, steht, anfährt oder anhält, am häufigsten vorkamen. Im Vergleich dazu waren weniger als die Hälfte Unfälle mit einem Fahrzeug, das entgegenkommt oder seitlich in gleicher Richtung fährt (siehe Unfallarten in Abb. 1.1 rechts).

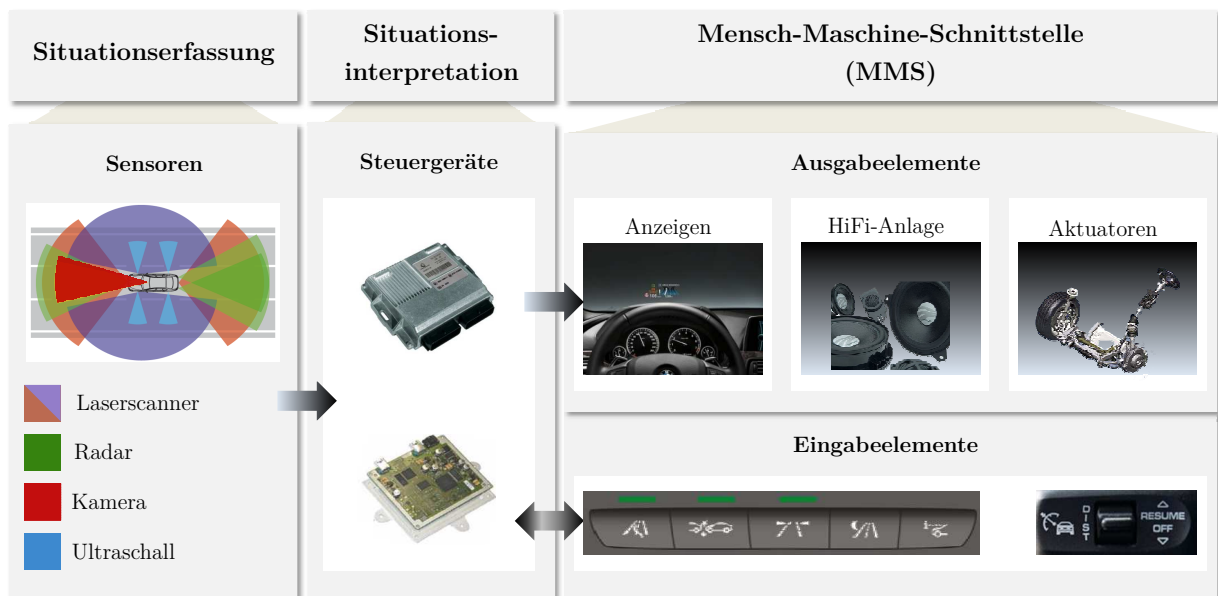


**Abbildung 1.1:** Nach Unfalltypen aufgeschlüsselte Verteilung der 306.266 Unfälle mit Personenschaden im Jahre 2011 [160] (links). Aufteilung des Unfalltyps „Unfall im Längsverkehr“ in entsprechende Unfallarten (rechts)

Die hohe Anzahl an jährlichen Verkehrstoten erfordert auch weiterhin die Neu- und Weiterentwicklung aktiver und passiver Sicherheitssysteme. Vertreter der Automobilindustrie räumen der aktiven Sicherheit mehr Entwicklungspotential ein als der passiven Sicherheit [148] [40]. Dies wird damit begründet, dass passive Sicherheitssysteme aufgrund hoher Bauraum- oder Steifigkeitsanforderungen teilweise schwer bis gar nicht realisierbar sind oder nur einen geringen Anteil von Kollisionsszenarien abdecken (z. B. „weiche“ Motorhaube siehe [91] [181]). Aktive Sicherheitssysteme sind dagegen relativ einfach in die Fahrzeugarchitektur integrierbar und können bereits die Entstehung einer kritischen Verkehrssituation verhindern. Das Fahrzeug erkennt rechtzeitig mögliche Kollisionsobjekte, warnt den Fahrer oder greift selbständig ein [180]. So hat zum Beispiel die Versicherungswirtschaft prognostiziert, dass durch die Verbreitung und Weiterentwicklung kollisionsvermeidender Fahrerassistenzsysteme die Anzahl der Unfälle im Längsverkehr in Zukunft um bis zu 20 % reduziert werden kann [62]. Aufgrund der vorangegangenen Ausführungen liegt der Fokus dieser Arbeit auf der aktiven Sicherheit. Es werden neuartige Warn- und Informationskonzepte für Fahrerassistenzsysteme entwickelt, die zur Vermeidung von Unfällen im Längsverkehr beitragen.

## 1.2 Stand der Technik

Laut der im EU-Projekt Response 3 vereinbarten Definition unterstützen Fahrerassistenzsysteme den Fahrer bei der Fahrzeugführung, übernehmen diese jedoch nicht vollständig, bestehen aus einer „Umwelterfassung und -bewertung“ und verfügen über eine komplexe Signalverarbeitung [153]. Diese Definition gilt maßgeblich für FAS, die den Fahrer mit Hilfe ihrer Umwelterfassung bei bestimmten Fahrmanövern unterstützen (z. B. bei einem Fahrstreifenwechsel). Demnach sind Systeme wie das ABS und ESP aufgrund ihrer fehlenden „Umwelterfassung und -bewertung“ keine Fahrerassistenzsysteme (beide Systeme erfassen keine Objekte in der Umgebung). Aus diesem Grund wird die erweiterte Definition von Lindberg [102] verwendet, wonach FAS den Fahrer auf allen drei Ebenen der Fahraufgabe unterstützen (Navigations-, Bahnführungs- und Stabilisierungsebene, siehe Kap. 2.1.1). Demzufolge können FAS aus einer Situationserfassung (den Sensoren), einer Situationsinterpretation (den Steuergeräten) und einer Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS) in Form von Ausgabe- und Eingabeeinheiten bestehen (z. B. Displays bzw. Bedienelemente, siehe Abb. 1.2).



**Abbildung 1.2:** Bestandteile von Fahrerassistenzsystemen in Anlehnung an die Definition von Lindberg [102] (Quelle Bilder: Internet und [1])

Die Situationserfassung nutzt verschiedene Sensoren, wie zum Beispiel Kameras, Laserscanner, Ultraschall- und Radarsensoren (Radar = radio detection and ranging), um Hindernisse oder andere Verkehrsteilnehmer in der Umwelt zu detektieren. In der Situationsinterpretation werden die vorliegenden Umweltinformationen interpretiert, bewertet und entsprechende Rückmeldungen über die MMS ausgegeben. Bei der MMS aktueller Fahrerassistenzsysteme muss zwischen zwei Gruppierungen unterschieden werden [138]:

- **Sicherheitssysteme** informieren oder warnen den Fahrer vor einer möglichen Kollision und greifen gegebenenfalls ein
- **Komfortsysteme** entlasten den Fahrer bei der Fahrzeugführung, indem sie Teile der Fahraufgabe übernehmen (z. B. Geschwindigkeitsregelung und Abstandshaltung durch das ACC)

In der Praxis bestehen zusätzliche Gruppierungen wie „Parken/Rangieren“ (z. B. automatisches Einparken) und „Licht/Sicht“ (z. B. Fernlichtassistent für automatisches Auf- und Abblenden bei Dunkelheit). Der Fokus dieser Arbeit liegt ausschließlich auf Fahrerassistenzsystemen wie der Auffahrwarnung, der Spurverlassens- und der Spurwechselwarnung, deren Situationserfassung und MMS am Beispiel der von BMW angebotenen Systeme kurz beschrieben wird (eine ausführliche Übersicht ist bei [179] zu finden):

### **Auffahrwarnung:**

Ein unterhalb der Frontstoßstange verbauter Radarsensor erfasst den vorausfahrenden Verkehr. Bremsst ein Fahrzeug so stark ab, dass eine Kollisionsgefahr droht, wird eine optische Vorwarnung in Form eines roten Fahrzeugsymbols im Kombiinstrument (KI) und Head-Up Display (HUD) ausgegeben. Reagiert der Fahrer nicht, wird die Ausgabe durch einen aufdringlichen Warnton verstärkt (Akutwarnung). Erfolgt weiterhin keine oder eine zu geringe Bremsreaktion des Fahrers, löst das System eine Bremsung mit einer Verzögerung von bis zu  $3\text{m/s}^2$  aus [151].

### **Spurwechselwarnung:**

Zwei in die Heckstoßstange verbaute Radarsensoren erfassen den rückwärtigen Verkehr auf dem linken und rechten Fahrstreifen. Befindet sich ein Fahrzeug im toten Winkel oder nähert sich so schnell von hinten an, dass es bei einem Fahrstreifenwechsel zu einer Kollision kommt, so leuchtet eine light-emitting diode (LED) im entsprechenden Außenspiegel auf (Informationsstufe). Setzt der Fahrer in diesem Fall zusätzlich den Blinker, so wird dies als Intention für einen Fahrstreifenwechsel bewertet, und die Spurwechselwarnung ausgelöst (Warnstufe). Bei dieser vibriert das Lenkrad pulsierend und die LED im Außenspiegel beginnt heller zu blinken [37].

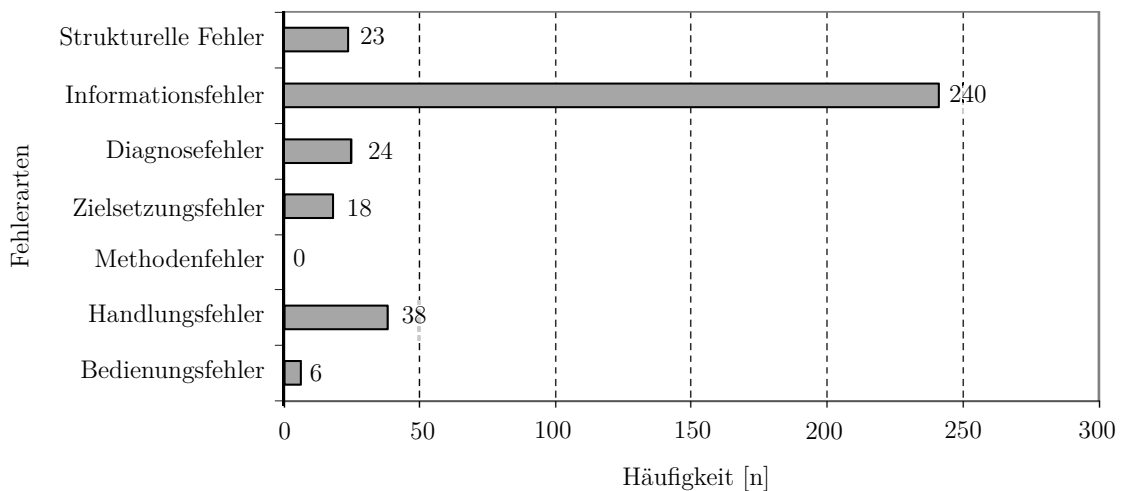
### **Spurverlassenswarnung:**

Eine in den Innenspiegelfuß integrierte Kamera erfasst die Fahrstreifenmarkierung. Wird ein Verlassen des eigenen Fahrstreifens erkannt, so wird der Fahrer durch eine Vibration im Lenkrad (hier nicht pulsierend) gewarnt. Setzt der Fahrer zuvor den Blinker, wird keine Warnung ausgegeben. Statt einer Vibration im Lenkrad bieten manche Hersteller das Aufschalten eines Gegenmoments an, das das Fahrzeug bei einer Annäherung an eine Fahrstreifenmarkierung zurück zur Fahrstreifenmitte führt [47].

## 1.3 Problemstellung und Ziele der Arbeit

Die Ursachen von Verkehrsunfällen sind vielfältig (siehe Abb. 1.3). Diese können unter anderem ein technischer Defekt (Strukturfehler) sowie eine falsche Situationseinschätzung

oder Handlung des Fahrers sein (Diagnose- bzw. Zielfehler) [186]. Die weit häufigste Ursache für einen Verkehrsunfall ist jedoch der Informationsfehler, bei dem der Fahrer handlungsrelevante Informationen gar nicht oder zu spät wahrnimmt [61] [55]. Ursachen für einen Informationsfehler können umweltbezogene Faktoren, wie zum Beispiel schlechte Lichtverhältnisse und Verdeckungen, oder fahrerbezogene Faktoren, wie eine verminderte Aufmerksamkeit sein. Grund hierfür sind Müdigkeit oder Ablenkung durch Objekte innerhalb oder außerhalb des Fahrzeugs (z. B. Nebenaufgaben bzw. Personen am Fahrbahnrand). Informationsfehler können durch Assistenzsysteme verhindert werden, indem frühzeitig Aufmerksamkeitsdefizite des Fahrers erkannt werden und die Aufmerksamkeit durch entsprechende Warnstrategien auf die Gefahr gelenkt wird. Aktuelle Assistenzsysteme berücksichtigen jedoch nicht den Aufmerksamkeitszustand des Fahrers in ihrer Warnstrategie und warnen tendenziell in der späten Phase einer kritischen Verkehrssituation. Der Fahrer verliert hierdurch unnötig Zeit zum Handeln.



**Abbildung 1.3:** Häufigkeit von Fehlerarten bei 312 per Fragebögen analysierten Unfällen. Mehrfachnennungen verschiedener Fehlerarten sind möglich [61]

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist daher, neuartige Warn- und Informationskonzepte zu entwickeln, die die Wahrscheinlichkeit eines Informationsfehlers bereits in der frühen Phase kritischer Verkehrssituationen reduzieren. Hierbei liegt der Fokus auf Unfällen im Längsverkehr, dem häufigsten Unfalltyp in Deutschland. Bei der Entwicklung der Assistenzkonzepte sind folgende Punkte zu berücksichtigen:

- Die Warn- und Informationsausgaben sollen eine schnelle Ausrichtung der Aufmerksamkeit auf die Gefahr bewirken und somit frühzeitig Aufmerksamkeitsdefizite kompensieren. Ein Verfahren zur Erfassung des Aufmerksamkeitszustands ist zu erarbeiten.
- Es sollen Schwachpunkte der MMS etablierter Fahrerassistenzsysteme sowohl von für die Fahrzeuglängs- als auch Fahrzeugquerführung identifiziert werden. Hieraus sind die Hauptgestaltungsmerkmale für die neuartigen Warn- und Informationskonzepte auf beiden Achsen der Fahrzeugführung abzuleiten.

- Ein Nachweis der Wirksamkeit der hier erarbeiteten Assistenzkonzepte ist im Rahmen von Fahrsimulatorstudien zu erbringen. Hierfür sollen sie im Fahrsimulator umgesetzt und mit Hilfe einer geeigneten Bewertungsmethodik evaluiert werden.

Der hierfür gewählte Aufbau der Arbeit ist in Abbildung 1.4 dargestellt. Die Strukturierung erfolgt nach der Unterteilung des Unfalltyps „Unfälle im Längsverkehr“ in die zugehörigen Unfallarten.

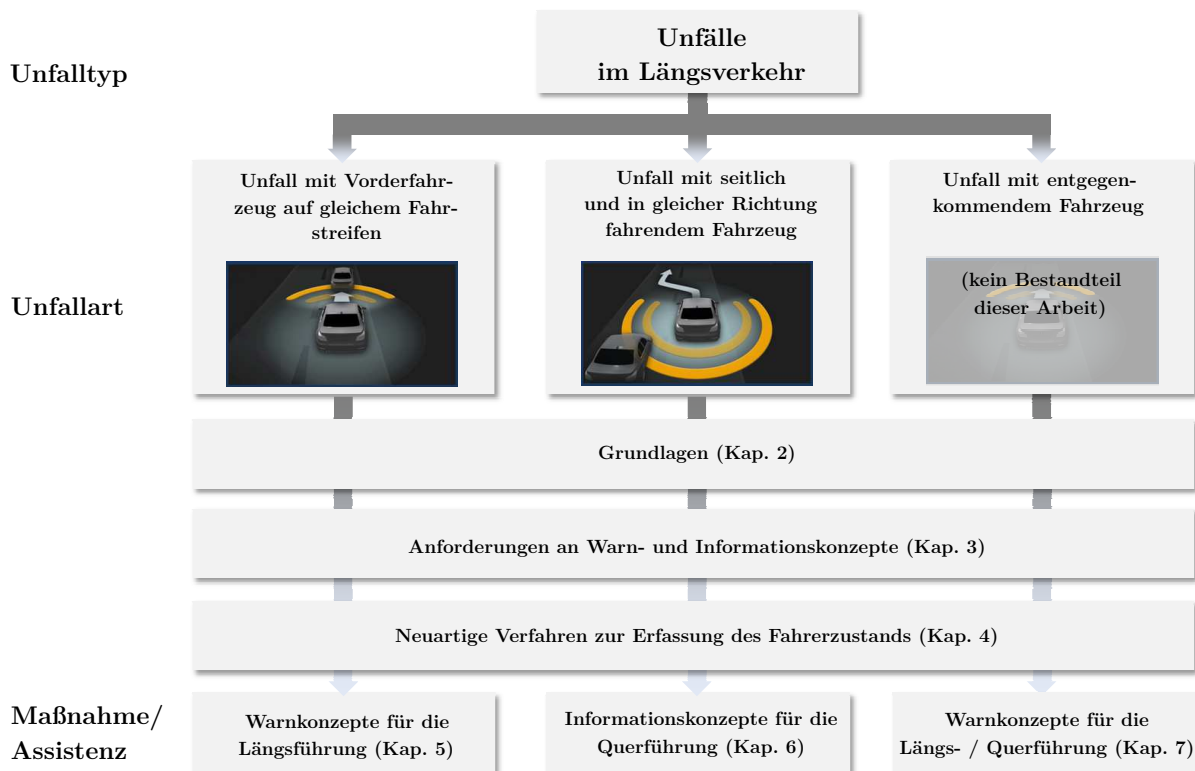


Abbildung 1.4: Strukturierung und Schwerpunkte der Arbeit (Quelle Bilder: [102])

Zuerst werden in **Kapitel 2** die relevanten Grundlagen, die zur Entwicklung der MMS von Fahrerassistenzsystemen notwendig sind, erarbeitet.

Danach erfolgt in **Kapitel 3** eine Bestandsaufnahme der etablierten MMS aktueller Fahrerassistenzsysteme. Auf Basis empirischer Befunde werden die Anforderungen an die Warn- und Informationskonzepte abgeleitet (z. B. Zeitbereich der Ausgaben, Gestaltungsaspekte).

Anschließend werden in **Kapitel 4** neuartige Verfahren zur Messung des visuellen Aufmerksamkeitszustands vorgestellt und bewertet. Hierdurch lassen sich Blickabwendungen bei Nebenaufgaben ohne Innenraumkamera und somit ausschließlich anhand der Fahrer-Fahrzeuginteraktion in Echtzeit messen.

Aufbauend auf Kapitel 4 werden in **Kapitel 5** fahrerabhängige Warnkonzepte für eine Auffahrwarnung entwickelt und bewertet (betrifft Fahrzeuginnenraumführung). Fahrerabhängig bedeutet hier eine von dem visuellen Aufmerksamkeitszustand abhängige Warnausgabe.

Es soll der Frage nachgegangen werden, wie für den Fall einer Blickabwendung vom Fahrgeschehen die Warnung einer Auffahrwarnung angepasst werden muss, damit die Aufmerksamkeit schnell zurück zur Straße gelenkt wird. Hierfür wird ein neuartiges Warnkonzept vorgestellt, das auf dem Prinzip einer stroboskopischen Bewegungsanimation beruht.

In **Kapitel 6** werden Informationskonzepte für eine Spurwechselwarnung entwickelt und bewertet (betrifft Fahrzeugquerführung). Es soll der Frage nachgegangen werden, wie Fahrzeuge im toten Winkel dargestellt werden müssen, damit sie jederzeit wahrnehmbar sind, der Fahrer ein verbessertes räumliches Situationsbewusstsein erhält, dabei jedoch nicht gestört oder abgelenkt wird. Hierbei wird erstmals im automobilen Kontext das Prinzip der akustischen Reflexion als Informationskonzept vorgestellt.

Die Ergebnisse und der wissenschaftliche Beitrag dieser Arbeit werden in **Kapitel 7** zusammengefasst. Die Frage nach der Verminderung von Unfällen mit einem entgegenkommenden Fahrzeug ist kein wesentlicher Bestandteil dieser Arbeit, wird in Kapitel 7 jedoch kurz behandelt.





# KAPITEL 2

---

## Grundlagen

---

Für die Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle von Fahrerassistenzsystemen sind grundlegende Kenntnisse über Fahrer, ihr Verhalten und ihre Leistungsfähigkeit notwendig. Dazu werden zu Beginn die Fahraufgabe und in diesem Zusammenhang relevante Begriffe systematisiert bzw. definiert. Darauf aufbauend wird der Einfluss des Fahrerzustands auf die Fahrzeugführung beschrieben. Zum einen wird erarbeitet, welche Fahrerzustände für diese Arbeit relevant sind und zum anderen, wie sie sich auf die Fahrzeugführung auswirken. Hieraus wird ein Anwendungsfall für das in Kapitel 4 vorgestellte Verfahren zur Erfassung des Fahrerzustands abgeleitet. Darüber hinaus werden das Fahrverhalten und das Unterstützungspotential von FAS beschrieben. Hierdurch lässt sich das Wirkpotential der in Kapitel 5 und 6 behandelten Assistenzkonzepte definitorisch in bestehende Verhaltensmodelle einordnen. Anschließend werden relevante Theorien zur Informationsverarbeitung, Aufmerksamkeitssteuerung und deren Grenzen sowie zum Situationsbewusstsein behandelt. Dies ist vor allem bei der Bewertung der Assistenzkonzepte in Kapitel 5 und 6 relevant, da hierdurch analysiert werden kann, an welcher Stelle und in welchem Ausmaß die Konzepte die Informationsverarbeitung beeinflussen können. Zuletzt werden relevante Mechanismen der visuellen und auditiven Informationsaufnahme beschrieben. Diese Erkenntnisse bilden die Grundlage zur Auslegung der Warn- und Informationskonzepte für die Auffahr- bzw. Spurwechselwarnung im weiteren Verlauf dieser Arbeit.

## 2.1 Der Autofahrer und seine Interaktion mit Fahrerassistenzsystemen

In der Literatur existieren zahlreiche Modelle und Theorien zur Beschreibung der Fahraufgabe und des Fahrerverhaltens. Daher werden nur die für diese Arbeit relevanten Erkenntnisse vorgestellt. Für eine detaillierte Beschreibung des Forschungsgebietes sei auf einschlägige Fachliteratur verwiesen (z. B. [27] [80]).

### 2.1.1 Systematisierung der Fahraufgabe

Zur Beschreibung der Fahraufgabe hat sich das von Donges [33] entwickelte Drei-Ebenen-Modell etabliert. Dieses teilt die Fahraufgabe hierarchisch in drei Teilaufgaben, bei denen per Top-Down-Ansatz die übergeordnete Teilaufgabe die Ziel- und Sollgrößen der untergeordneten Teilaufgabe vorgibt.

Auf der obersten Ebene, der **Navigationsebene**, legt der Fahrer seine Fahrroute durch das Straßennetz fest (z. B. von München nach Nürnberg über die A9). Bei der Auswahl seiner Strecke wägt der Fahrer verschiedene Kriterien wie beispielsweise den Fahrtzweck, die zu erwartende Fahrzeit, eventuelle Zwischenziele oder die Sicherheit einer Strecke ab. Die Häufigkeit der Aufgabenbewältigung auf der Navigationsebene ist eher niedrig, jedoch benötigen die Aufgaben mehr Zeit und aufgrund ihrer Komplexität eine höhere mentale Beanspruchung [137]. Der Zeithorizont von Handlungen auf der Navigationsebene erstreckt sich je nach Fahrtdauer von wenigen Minuten bis zu mehreren Stunden [21]. Hierbei können zum Beispiel Navigationssysteme den Fahrer unterstützen.

Auf der **Bahnführungsebene** leitet der Fahrer Fahrmanöver ein, die zur Erreichung des aus der Navigationsebene festgelegten Fahrziels erforderlich sind. Hierzu gehören Fahrmanöver wie z. B. das Abbiegen an Kreuzungen, der Wechsel des Fahrstreifens, das Einhalten des Abstands zum vorausfahrenden Verkehr und das Reagieren auf Verkehrszeichen. Tätigkeiten auf der Bahnführungsebene liegen im Sekundenbereich [21]. Fahrerassistenzsysteme wie zum Beispiel das ACC oder die Spurwechselwarnung unterstützen den Fahrer auf der Bahnführungsebene.

Auf der untersten Ebene, der **Stabilisierungsebene**, werden die Vorgaben aus der Bahnführungsebene durch Bedieneingaben an Gas-, Bremspedal und Lenkrad umgesetzt. Der Fahrer bildet einen Regler, der Abweichungen des Fahrzeugs von der Sollspur durch entsprechende Steuereingaben kompensiert. Beispiele sind der Ausgleich von Unebenheiten im Straßenverlauf oder ein Übersteuern bei vereister Fahrbahn. Die hierfür notwendigen Kompensationshandlungen liegen im Bereich von mehreren hundert Millisekunden [21], laufen nahezu unbewusst ab und benötigen nur geringe kognitive Ressourcen [137]. Auf der Stabilisierungsebene können Systeme wie das ABS oder das ESP den Fahrer unterstützen.

Alle Tätigkeiten, die im Drei-Ebenen-Modell definiert sind, werden als primäre Fahraufgabe bezeichnet [54]. Bubb [24] erweiterte dies mit der Definition der sekundären und tertiären Fahraufgabe (siehe Abb. 2.1).



**Abbildung 2.1:** Bedien- und Anzeigebereiche für die primäre, sekundäre und tertiäre Fahrzeuginteraktion (Quelle Bilder: BMW Pressclub)

Bei der **primären Fahraufgabe** handelt es sich um die Führung des Fahrzeugs selbst mit dem Ziel, „jede Berührung mit stehenden oder sich bewegenden Objekten im Verkehrsraum zu vermeiden“ [24]. Darüber hinaus unterteilen Allen et al. [4] jede Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug, die dem eigentlichen Fahrprozess dient, in Quer- und Längsführung. Die Fahrzeug-**Längsführung** umfasst alle Teilvorgänge, die zur Regulierung der Geschwindigkeit beitragen (z. B. Beschleunigung durch Gas geben oder Bremsen). Tätigkeiten, die eine Aktion quer zur Fahrtrichtung bewirken (z. B. Spurhaltung durch Lenken), gehören der Fahrzeug-**Querführung** an.

Die **sekundäre Fahraufgabe** bezieht sich auf Tätigkeiten, die nicht dem eigentlichen Führen des Fahrzeugs dienen, sich aber aktiv oder reaktiv aus Umständen außerhalb des Fahrzeugs ergeben. So ist die Betätigung der Wisch- und Lichtanlage (Abblenden bei Gegenverkehr) als eine Reaktion auf bestimmte Umwelt- oder Verkehrsbedingungen zu verstehen und somit eine reaktive Sekundäraufgabe. Bei aktiven Sekundäraufgaben geht die Initiative allein vom Fahrer aus, um aktiv mit der Umwelt interagieren zu können (z. B. Setzen des Blinkers) [24].

Die **tertiäre Fahraufgabe** steht, im Gegensatz zu der primären und sekundären Aufgabe, nicht direkt mit der eigentlichen Fahraufgabe in Verbindung. Sie befriedigt ausschließlich Komfort-, Unterhaltungs- und Informationsbedürfnisse der Fahrzeuginsassen. Hierzu zählen beispielsweise die Bedienung der Heizung, des Radios oder sonstiger Unterhaltungsmedien (z. B. Internet, usw.) [133]. Die Tertiärinteraktion erfolgt bei vielen Herstellern mittlerweile über ein Anzeige- und Bedienkonzept, bei dem der Ort der Bedienung vom Ort der Anzeige getrennt ist (siehe iDrive-Konzept von BMW in Abb. 2.1). Der Fahrer steuert über einen in der Mittelkonsole integrierten Dreh-Drück-Steller Menüs, die in einem Display – dem sogenannten Central Information Display (CID) – in der Mitte der Instrumententafel angezeigt werden [15] [10].

## 2.1.2 Der Fahrerzustand und sein Einfluss auf die Fahrzeugführung

Nach Kopf [94] beschreibt der Fahrerzustand „alle fahrrelevanten Informationen über den momentan mit der Fahraufgabe beschäftigten Fahrer“. Die Faktoren zur Beschreibung des Fahrerzustands lassen sich nach ihrer Verweildauer in drei Gruppen einteilen:

- **Überdauernde Faktoren** sind gar nicht oder nur langfristig veränderlich. Verweildauer: Monate, Jahre (z. B. Konstitution, Fahrkönnen, Fahrerfahrung, Belastbarkeit, Persönlichkeit, sensorische und motorische Fähigkeiten oder Behinderungen)
- **Fahrtrahmenbezogene Faktoren** sind mittelfristig veränderlich. Verweildauer: Tage, Stunden (z. B. Ermüdung, Tagesrhythmus, individuelle Strategie, gesundheitliche Einschränkungen, Alkohol- oder Drogeneinfluss)
- **Kurzfristige Faktoren**, Verweildauer: Minuten, Sekunden (z. B. Aufmerksamkeitszustand, Vigilanz, Emotion, Beanspruchung, Anstrengung und Aktivierung)

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf dem kurzfristigen Faktor Aufmerksamkeitszustand. Der Einfluss des Aufmerksamkeitszustands auf die primäre Fahraufgabe wurde bereits in zahlreichen Studien untersucht (siehe Literatur-Review von Young und Regan [184]). Zum Beispiel wurden in der sogenannten „100 Car Study“ über einen Zeitraum von 13 Monaten Fahr- und Videodaten von mehreren Autofahrern in Alltagssituationen aufgezeichnet [118]. Die Auswertung ergab, dass bis zu 80 % aller vorkommender Unfälle und 65 % der Beinaheunfälle auf eine verminderte Aufmerksamkeit zurückgeführt werden konnten. Neben Gesprächen mit anderen Passagieren, dem Auspacken und Essen von Lebensmitteln waren vor allem Tertiärinteraktionen mit dem Radio, der Klimaanlage oder einem mobilen Endgerät (Telefon, Organizer, usw.) häufige Ursachen für eine verminderte Aufmerksamkeit. Auswirkungen solcher Tertiär-Aufgaben auf die primäre Fahraufgabe untersuchten auch Stozmann et al. [161]. Demnach verlängerten z. B. Zieleingaben ins Navigationssystem die Reaktionszeit um bis zu 500 ms. Darüber hinaus hat Sacher [144] in einem Feldversuch die Bedienhäufigkeit bestimmter Tertiär-Aufgaben untersucht. So umfassten 35 % aller Tertiärinteraktionen Bereiche des Infotainments (Radio, CD, MP3, usw.) und des Navigationssystems. Hierfür wurde der Dreh-Drück-Steller im Schnitt 13 Mal pro Stunde betätigt. Weitere Einflüsse von visuell-motorischen und kognitiven Nebenaufgaben auf die primäre Fahraufgabe stellen Rauch et al. [135] anhand empirischer Befunde aus der Literatur zusammen (siehe Beispiele in Tab. 2.1).

Aufgrund der hohen Nutzungsrate des Infotainments und der daraus resultierenden Effekte auf die primäre Fahraufgabe – z. B. eine Verringerung der Reaktionszeit – ist eine verminderte Aufmerksamkeit aufgrund von Tertiär-Tätigkeiten zentraler Anwendungsfall in Kapitel 4 und 5. So soll das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren Blickabwendungen ins CID während iDrive-Bedieneingaben in Echtzeit schätzen, wodurch Warngaben für eine Auffahrwarnung an den Fahrerzustand angepasst werden können.

Parametergruppe	Parameter	kognitive NA	visuelle NA
Längsführung	Abstand	+	+
	Mittlere Geschwindigkeit	0	–
	Standardabweichung der Geschwindigkeit	+	+
Querführung	Standardabweichung der Spurposition (SDLP)	0 (–)	+
	Anzahl Spurübertretungen		0
	Zeit der Spurübertretungen		0
	Mittlere Spurposition (MLP)	0	0
	Lenkfrequenz	0	0
	Anzahl der Umkehrungen im Lenkwinkel (SWRR)	0	+
	Lenkentropie	+	+
	Anzahl große Lenkkorrekturen		+
	Anzahl schnelle Lenkbewegungen	0	+
Reaktionszeit auf kritische Ereignisse		+	+

**Tabelle 2.1:** Tendenzieller Einfluss motorisch-visueller und kognitiver Nebenaufgaben (NA) auf die primäre Fahraufgabe, erarbeitet in einer Metaanalyse von Rauch et al. [135] (0  $\hat{=}$  kein Einfluss, +  $\hat{=}$  Erhöhung des Parameters, –  $\hat{=}$  Verringerung des Parameters, leeres Feld  $\hat{=}$  keine Befunde vorhanden)

**Exkurs: Begriffsdefinition Ablenkung vs. Abwendung:**

In der öffentlichen Diskussion werden Nebenaufgaben – wie z. B. Navigationseingaben – häufig mit dem Begriff Ablenkung in Verbindung gebracht. Die Verwendung dieses Begriffs ist in diesem Zusammenhang nicht korrekt, da nach der Art der Aufmerksamkeitssteuerung unterschieden werden muss. Beschäftigt sich der Fahrer während der Fahrt mit einer Nebenaufgabe, so wendet er sich willentlich selber von der primären Fahraufgabe ab, weshalb in diesem Fall von **Abwendung** gesprochen wird (intern motivierte Aufmerksamkeitssteuerung). **Ablenkung** liegt dagegen vor, wenn die Aufmerksamkeit durch Reize von außen beeinflusst wird (extern verursachte Aufmerksamkeitssteuerung). Beispielsweise kann ein Hinweisreiz im peripheren Sichtfeld den Aufmerksamkeitsfokus „ablenken“ [128].

**2.1.3 Das Fahrerverhalten und das Unterstützungspotential von Fahrerassistenzsystemen**

Rasmussen [132] hat den Bedarf an kognitiven Ressourcen nach Handlungen klassifiziert und das heute in der Verkehrspsychologie häufig zitierte „Handlungsmodell“ entwickelt.

Dieses unterscheidet zwischen drei Ebenen des menschlichen Verhaltens (siehe Abb. 2.2 links):

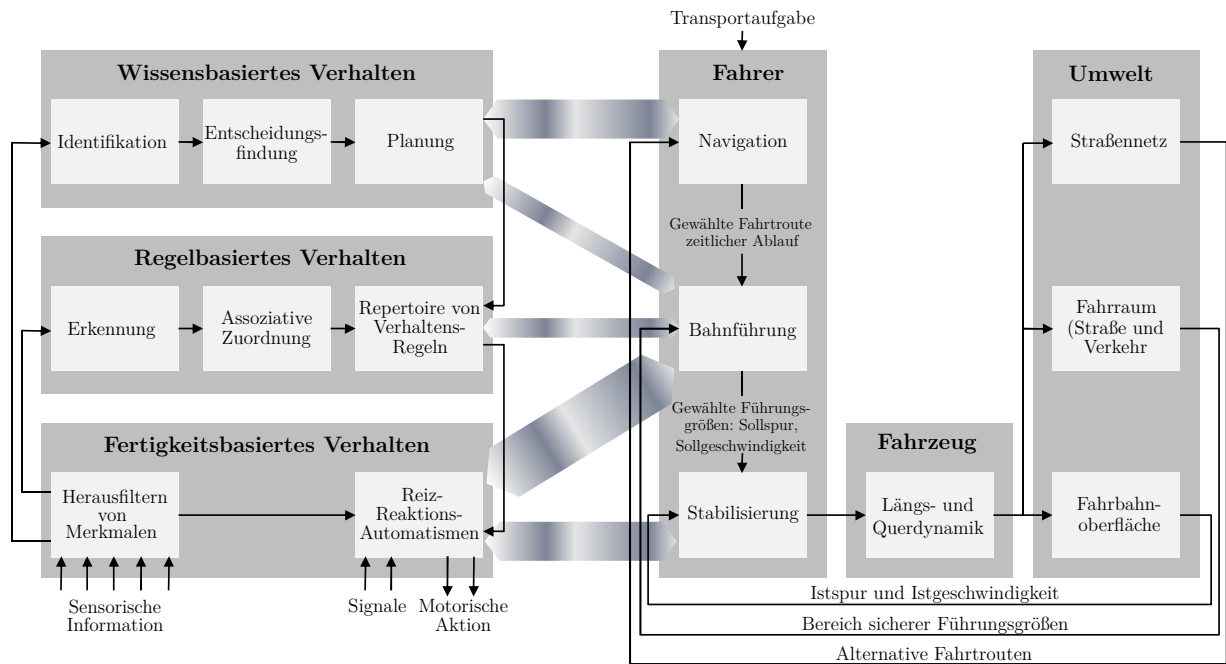
Auf der obersten Ebene des Handlungsmodells ist das **wissensbasierte Verhalten** verankert. Kann der Fahrer eine vorliegende Situation nicht auf bereits bekannte Probleme übertragen, so greift er auf sein abstraktes Wissen zurück und erarbeitet durch analytische Prozeduren verschiedene Lösungsvarianten. Diese können von der Kombination und Übertragung bereits erlernter Regeln bis hin zu vollständig neuartigen Handlungen reichen. Dem entsprechend ist die kognitive Beanspruchung hoch, wodurch Handlungen auf dieser Ebene am meisten Zeit in Anspruch nehmen. Ein Beispiel ist die Routenplanung in einer fremden Stadt.

Die mittlere Ebene beinhaltet Handlungen, die durch **regelbasiertes Verhalten** gekennzeichnet sind. Der Fahrer versucht hierbei, vorliegende Situationen auf aus der Vergangenheit bekannte Problemstellungen zu übertragen. Bereits gelöste Problemstellungen werden als Vorlage zur Lösung ähnlicher Sachverhalte verwendet. Ein Beispiel ist das Reduzieren der Geschwindigkeit bei Straßenglätte. Assistenzsysteme können den Fahrer hier durch entsprechende Warnhinweise vor einer kritischen Verkehrssituation bewahren (z. B. Glatteiswarnung, Information der Spurwechselwarnung über ein Fahrzeug im toten Winkel, usw.).

Die unterste Ebene beschreibt das **fertigkeitsbasierte Verhalten**. Hier laufen Handlungen größtenteils unbewusst ab, da diese durch häufige Wiederholung zur Routine geworden sind und somit automatisch nach dem Auftreten bestimmter Muster oder Reize ablaufen. Die Reaktionszeit und kognitive Beanspruchungen sind hier eher gering [187]. Beispiele hierfür sind das Schalten, Kuppeln sowie die Spurhaltung. Fahrerassistenzsysteme unterstützen den Fahrer auf dieser Ebene, indem sie Defizite bezüglich seiner Reaktionsfähigkeit kompensieren, z. B. zu lange Reaktionszeiten durch einen Bremsengriff oder zu schwache Bremspedalbetätigung durch Bremskraftverstärkung.

Gründl [61] und Wiltchko [178] haben die beiden hier beschriebenen Drei-Ebenen-Modelle der Fahraufgabe und der Handlung miteinander in Verbindung gebracht. Grundsätzlich gilt, dass Tätigkeiten auf der Navigationsebene eher wissensbasiert sind, Tätigkeiten auf der Führungsebene eher regelbasiert und Tätigkeiten auf der Stabilisierungsebene fertigkeitsbasiert. Diese strikte Zuordnung ist jedoch nicht immer möglich. Zum Beispiel laufen bei einem Fahrschüler in der ersten Fahrstunde Handlungen auf der Stabilisierungsebene eher wissensbasiert ab (weitere Ausnahmen und Beispiele siehe [61]). Letztendlich bestimmt die individuelle Erfahrung des Fahrers, inwieweit sich Handlungen auf die drei Ebenen der Fahraufgabe verteilen. Donges [34] hat die beiden Modellansätze anschaulich in Verbindung gebracht (siehe Abb. 2.2). Die Dicke der grauen Verbindungspfeile repräsentiert das Ausmaß der Zusammenhänge zwischen den Ebenen beider Modelle.

In Bezug auf die Forderungen nach einer schnellen Ausrichtung der Aufmerksamkeit aus Kapitel 1 sollen die neuartigen Warn- und Informationskonzepte tendenziell fertigkeits- und regelbasiertes Verhalten hervorrufen. Die Aufmerksamkeitsausrichtung soll dabei schnellen Reiz-Reaktionsautomatismen folgen und wenig kognitive Ressourcen in Anspruch nehmen



**Abbildung 2.2:** Kombiniertes Drei-Ebenen-Modell [34], bestehend aus dem Handlungsmodell von Rasmussen [132] (links) und dem Modell der Fahraufgabe von Donges [33] (rechts)

(fertigkeitsbasiert). Die Auswahl der entsprechenden Handlung auf der Bahnführungsebene läuft eher regelbasiert ab (z. B. Entscheidung für einen Fahrstreifenwechsel).

## 2.2 Grundlagen der Informationsverarbeitung

Wird der Mensch als ein System mit Ein- und Ausgängen betrachtet, so kann angenommen werden, dass auf der Eingangsseite eintreffende Signale in eine kognitive Repräsentation und danach auf der Ausgangsseite in eine Reaktion transformiert werden [175]. Dieser Prozess wird im Allgemeinen als Informationsverarbeitung bezeichnet. Die Aufnahme von Umweltinformationen geschieht beim Autofahren hauptsächlich über die visuelle, auditive, taktile, vestibuläre und kinästhetische Wahrnehmung.

### 2.2.1 Modelle zur Informationsverarbeitung

Zwei Kategorien von theoretischen Modellen zur Informationsverarbeitung existieren: Sequenzielle Stufenmodelle und kapazitiv orientierte Ressourcenmodelle.

#### Stufenmodelle:

Bei den Stufenmodellen wird davon ausgegangen, dass die Informationsverarbeitung Zeit beansprucht und verschiedene Verarbeitungsstufen sequenziell durchlaufen werden. Demnach sind drei Haupt-Verarbeitungsstufen definiert [146]:

- In der ersten Phase, der **Informationsaufnahme**, erfolgt eine Extraktion und Vorverarbeitung von Informationen aus der Umwelt über die entsprechenden Sinneskanäle
- In der nächsten Phase, der **Informationsverarbeitung**, geht es um das Erkennen der aufgenommenen Informationen und die Identifikation von Merkmalen. Daraus werden Handlungsmöglichkeiten abgeleitet und ausgewählt
- In der letzten Phase, der **Informationsumsetzung**, erfolgen Handlungen in Form von motorischen Reaktionen oder Aktionen zur Informationsabgabe (z. B. Sprache)

Auch das in Kapitel 2.1.3 beschriebene Handlungsmodell von Rasmussen [132] (siehe Abb. 2.2 links) gehört zu den Stufenmodellen. Rasmussen unterscheidet hierbei zusätzlich, auf welcher Ebene des menschlichen Verhaltens die Informationsverarbeitung stattfindet. Je niedriger die Verarbeitungsebene (z. B. fertigkeitbasiertes Verhalten), desto automatischer laufen Prozesse ab, wodurch weniger Verarbeitungskapazitäten benötigt werden (weitere Stufenmodelle werden in der Arbeit von Jürgensohn und Timpe [81] beschrieben).

### **Ressourcenmodelle:**

Bei den Ressourcenmodellen wird davon ausgegangen, dass die Informationsverarbeitung Kapazitäten kostet, und die hierfür benötigten Ressourcen limitiert sind. Der Mensch kann seine Kapazität je nach Bedarf bestimmten Prozessen zuordnen [82]. Ressourcenmodelle kommen auch bei den Theorien zur Aufmerksamkeitssteuerung zum Einsatz (siehe Kap. 2.2.3).

### **Hybridmodelle:**

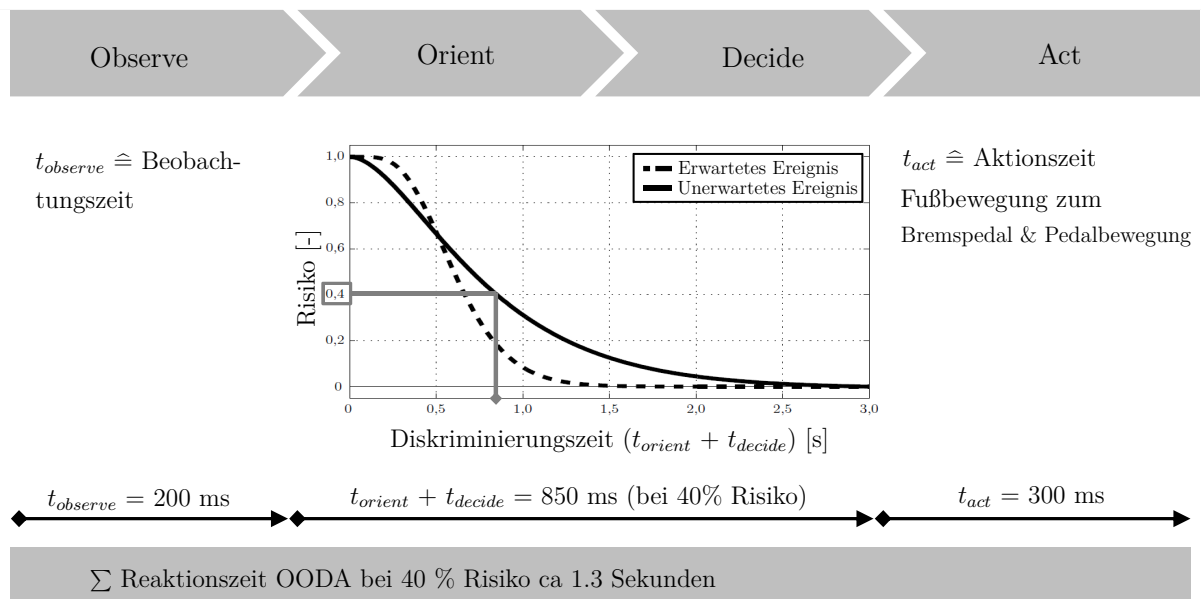
Ein in der Literatur weit verbreiteter Ansatz besteht in einer Kombination der beiden oben beschriebenen Modelle. So gehen Hybridmodelle von einer Art Mischsystem aus, in dem mehrere, voneinander unabhängige und parallel laufende Verarbeitungsprozesse stattfinden können. Eine wichtige Annahme dabei ist, dass manche Aufgaben über bestimmte Verarbeitungsmechanismen laufen und dabei verschiedene Ressourcen in Anspruch nehmen. Demnach interferieren parallele Aufgaben, wenn sie Ressourcen gemeinsam nutzen, was zu einer gegenseitigen Beeinflussung – sprich Leistungsminderung – führt. Eine parallele und ungestörte Ausführung mehrerer Aufgaben ist jedoch dann möglich, wenn diese verschiedene Verarbeitungsmechanismen betreffen. Das Multiple Ressourcen-Modell von Wickens [175] greift diesen Grundgedanken auf. Der zentrale Punkt des Modells ist die Definition dreier dichotomer Dimensionen, bestehend aus den Verarbeitungsstufen (stages), den Verarbeitungstypen (codes) und den Wahrnehmungsmodalitäten (modalities) – veranschaulicht durch den sogenannten „Wickenswürfel“. Kernaussage ist, dass zwei Aufgaben eine umso höhere Interferenz aufweisen, je mehr gemeinsame Ressourcen von ihnen beansprucht werden [140]. Zum Beispiel interferiert die primäre Fahraufgabe mit einer Nebentätigkeit wie z. B. Navigationseingaben im CID, da sowohl die Fahr- als auch Nebenaufgabe visuell-motorisch sind (gleiche „modalities“). Ähnlich wie beim Multiplen Ressourcen-Modell von Wickens ist es beim Arbeitsgedächtnismodell von Baddeley [7] möglich, mehrere Aufgaben unterschiedlichen Typs gleichzeitig auszuführen. Das Modell besteht aus einer zentralen Exekutiven (englisch: central executive), die die Verteilung der Arbeitsprozesse auf drei Speichermodule des Kurzzeitgedächtnisses regelt (phonologische Schleife,



räumlich-visueller Notizblock, episodischer Puffer). Dabei werden verbale Informationen in der phonologischen Schleife und visuell-räumliche Informationen im räumlich-visuellen Notizblock zwischengespeichert, wobei die Prozesse für räumliche (z. B. Objektposition, -bewegung) und visuelle (z. B. Form, Farbe) Informationen in unterschiedlichen Verarbeitungsmechanismen ablaufen. Ähnlich wie bei dem Modellansatz von Wickens weisen zwei Aufgaben eine Interferenz auf, wenn sie sich ein Speichermodul teilen. Sind sie jedoch auf zwei Speichermodule verteilt, können sie weitestgehend interferenzfrei ablaufen.

### 2.2.2 Modelle zur Reaktionszeit

Die Reaktionszeit ist die Zeit, die zwischen der objektiven Reaktionsaufforderung und der Einleitung einer Antwort darauf vergeht [26]. Im Kontext dieser Arbeit ist das die Zeitdauer vom Beginn eines kritischen Ereignisses wie zum Beispiel dem Abbremsen eines Vorderfahrzeugs oder der Ausgabe einer Warnmeldung bis zu einer Fahrerreaktion. Die meisten Reaktionszeitmodelle orientieren sich am Prinzip der Stufenmodelle, d. h. unter der Annahme, dass die Informationsverarbeitung in separaten Phasen abläuft und Zeit in Anspruch nimmt. Eine Übersicht über bestehende Reaktionszeitmodelle gibt Bäumler [26]. Diese Modelle haben jedoch gemein, dass sie auf Probandenstudien basieren, in denen die Fahrer auf die Reaktionsaufforderung vorbereitet sind. Daher wird hier das im Forschungsprojekt AKTIV entwickelte Reaktionszeitmodell verwendet, welches auch von einem unvorbereiteten Fahrer ausgeht [139] [85]. Dieses basiert auf dem sogenannten OODA-Loop von Ullman [167], das aus den Phasen „Observe“, „Orient“, „Decide“ und „Act“ besteht (übersetzt: Beobachten, Einordnen, Entscheiden und Handeln, siehe Abb. 2.3).



**Abbildung 2.3:** Phasen des OODA-Loops und Beispiel für eine Reaktionszeit auf ein unerwartetes Ereignis mit einem Risiko von 40 % [139]

In der Phase „Observe“ werden Umweltinformationen über die Sinneskanäle aufgenommen, was in etwa 200 ms dauert. Die Phase „Orient“ beinhaltet das Fokussieren der Aufmerksamkeit auf ein bestimmtes Objekt, und in der Phase „Decide“ interpretiert der Fahrer die neuen Informationen und aktualisiert seine Einschätzung des Handlungsbedarfs. Die letzte Phase „Act“ umfasst die motorische Handlung, also die Fußbewegung vom Gas- auf das Bremspedal und dessen Betätigung, was in etwa 300 ms in Anspruch nimmt. Die Dauer der Phasen „Orient“ und „Decide“ kann nicht bestimmt werden, da das Ende der „Orient“- bzw. der Beginn der „Decide“-Phase nicht messbar ist. Kates [85] fasst diese beiden Phasen daher als „Diskriminierungszeit“ zusammen. Die Länge der Diskriminierungszeit hängt von mehreren Faktoren wie z. B. Stärke des Überraschungseffekts, Art des Reizes oder Anzahl der Handlungsoptionen ab. Kates erstellte auf Basis empirischer Befunde mehrere Gammaverteilungen der Diskriminierungszeit. In den dafür zugrundeliegenden Studien wurde die Reaktionszeit auf ein bremsendes Vorderfahrzeug gemessen. Dabei wurde zwischen Ereignissen, in denen die Fahrer auf „erwartete Signale“ [59] [79] oder auf „unerwartete, aber bekannte Situationen“ [59] [121] reagieren müssen, unterschieden. Reinisch [139] leitete aus den verschiedenen Gammaverteilungen zwei Risikofunktionen zur Bestimmung der Diskriminierungszeit – jeweils für erwartete und unerwartete Ereignisse – ab. In Abbildung 2.3 wird gezeigt, dass sich auf Basis dieser Risikofunktionen z. B. bei 60 % der Fahrer – also mit einem Risiko von 40% – eine Diskriminierungszeit von etwa 850 ms auf ein unerwartetes Ereignis ergibt.

### 2.2.3 Der Begriff Aufmerksamkeit

Die historische Definition von James [78] besagt, dass Aufmerksamkeit die Selektion von relevanten Informationen aus der Vielzahl aller Informationen, die ständig über alle Sinneskanäle des Menschen aufgenommen werden, ist. Es wird zwischen ungerichteter und gerichteter Aufmerksamkeit unterschieden:

#### **Ungerichtete Aufmerksamkeit:**

Diese beschreibt den Zustand oder den „Grad der Bereitschaft“, die Aufmerksamkeit über einen längeren Zeitraum, z. B. in monotonen Situationen, aufrecht zu erhalten, mit dem Ziel auf selten auftretende Reize angemessen reagieren zu können [35]. Sie wird auch als Daueraufmerksamkeit oder Vigilanz (Wachsamkeit) bezeichnet.

#### **Gerichtete Aufmerksamkeit:**

Diese bezieht sich auf Aspekte der Umgebung [94] und kann wiederum in geteilte und selektive Aufmerksamkeit gegliedert werden [97]:

- Unter **geteilter Aufmerksamkeit** wird das simultane Beachten verschiedener Reize über einen oder mehrere Sinneskanäle verstanden. Hierbei geht es um die Fähigkeit zur schnellen, sowohl kontrollierten als auch automatisierten Organisation von Mehrfachaufgaben
- Bei der **selektiven Aufmerksamkeit** erfolgt eine Auswahl aller relevanten Aspekte der Umgebung, indem als irrelevant eingestufte Informationen ignoriert werden

Bestehende Modelle zur gerichteten Aufmerksamkeit haben gemein, dass sie von einem Engpass in der Reizverarbeitung („Flaschenhals“) ausgehen. Das bedeutet, dass nicht alle eingehenden Reize, die zu einem bestimmten Zeitpunkt über die Sinneskanäle aufgenommen werden, bewusst wahrgenommen und verarbeitet werden können. Ein Beispiel hierfür ist das Look-but-failed-to-see Phänomen. Dieses liegt vor, wenn ein relevantes, aber unerwartetes Objekt nicht bewusst wahrgenommen wird, obwohl es zuvor angeblickt wurde. Selbst wenn eine Fixation des Blicks auf das Objekt oder eine visuelle Suche in Richtung des Objekts vorliegt, kann es zu diesem Phänomen kommen [23].

Die in dieser Arbeit vorgestellten Warn- und Informationskonzepte sollen dem Fahrer sowohl bei der geteilten als auch selektiven Aufmerksamkeit assistieren. Die in Kapitel 5 und 6 erarbeiteten fahrerabhängigen Warnkonzepte der Auffahrwarnung und Informationskonzepte der Spurwechselwarnung sollen eine gezielte Ausrichtung der Aufmerksamkeit verursachen (selektive Aufmerksamkeit) bzw. bei der Überwachung der Umgebung unterstützen (geteilte Aufmerksamkeit).

### 2.2.4 Das Konstrukt Situationsbewusstsein

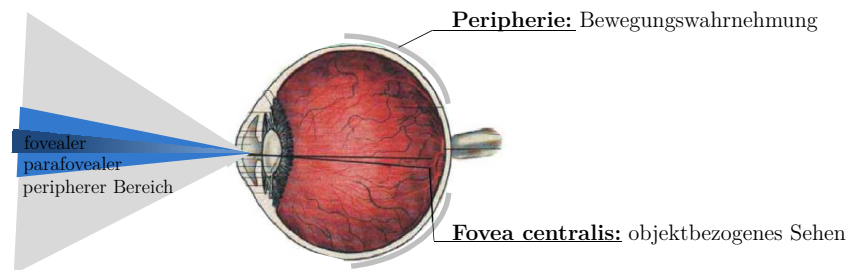
Das Konstrukt Situationsbewusstsein (englisch: Situational Awareness), dem die zuvor beschriebenen Informationsverarbeitungsprozesse zu Grunde liegen, hat seinen Ursprung in der Human Factors Forschung und nimmt konkreten Bezug auf hochdynamische Aufgaben, in denen Operateure komplexe Situationen wahrnehmen, verstehen und Ereignisse antizipieren müssen. Das Konstrukt hat durch seinen Anwendungsbezug eine hohe Relevanz für die vorliegende Arbeit, da hierdurch der Einfluss von Assistenzkonzepten auf das Situationsverständnis bewertet werden kann (siehe Kap. 6). Nach Smith und Hancock [155] beschreibt das Situationsbewusstsein das notwendige Wissen über eine Situation innerhalb einer gegebenen Umwelt und unter Berücksichtigung einer zu erfüllenden Aufgabe. Das Modell von Endsley [41] wird häufig zur Beschreibung des Situationsbewusstseins verwendet. Dieses besteht aus drei aufeinander aufbauenden Ebenen, die noch vor der Entscheidungsphase im Informationsverarbeitungsprozess verankert sind. Die erste Ebene „perception“ repräsentiert Prozesse, die für die Wahrnehmung relevanter Informationen aus der Umgebung verantwortlich sind, um ein mentales Modell der Situation aufzubauen. Auf der zweiten Ebene „comprehension“ geht es um die Interpretation der Einzelinformationen, um ein Verständnis der Gesamtsituation zu erschaffen. Zuletzt wird auf der dritten Ebene „projection“ aus dem bestehenden Wissen über den aktuellen Zustand und das dynamische Verhalten aller vorhandener Objekte die zukünftige Entwicklung der Situation extrapoliert. Eine wichtige Rolle beim Aufbau des Situationsbewusstseins spielen individuelle personenbezogene Faktoren, wie z. B. Fähigkeiten, Erfahrungen oder Erwartungen. Nach Sarter und Woods [145] gibt es vier Komponenten des Situationsbewusstseins, das räumliche- (Relativpositionen von Objekten in der Umgebung), das Identitäts- (eigene Aufgaben, Ziele in der Gesamtsituation), das Modus- (Wer hat wie viel Kontrolle) und das zeitliche Bewusstsein (zeitlicher Ablauf der Ereignisse). Vor allem die Verbesserung des räumlichen Situationsbewusstseins stellt eine zentrale Anforderung an die Informationskonzepte in Kapitel 6 dar.

## 2.3 Grundlagen der Wahrnehmungspsychologie

Da die in dieser Arbeit vorgestellten Warn- und Informationskonzepte den Fahrer vorrangig in der ersten Phase der Informationsverarbeitung, in der Informationsaufnahme, unterstützen sollen, ist ein grundlegendes Verständnis der sensorischen Reizaufnahme und deren Vorverarbeitung notwendig. Im Folgenden werden daher grundlegende Mechanismen der visuellen und auditiven Wahrnehmung vermittelt. Auf die taktile, vestibuläre sowie kinestatische Reizaufnahme wird nicht eingegangen, da diese für die in Kapitel 5 und 6 dargestellten Assistenzkonzepte keine Rolle spielen. Die folgenden Ausführungen sind eine kurze Zusammenfassung der Grundlagenliteratur (siehe z. B. [57] [83] [45] [149]).

### 2.3.1 Visuelle Wahrnehmung

Die visuelle Wahrnehmung ist die wichtigste Informationsquelle beim Autofahren und entscheidend bei der Aufmerksamkeitslenkung und -verteilung. Das von Objekten der Umgebung reflektierte Licht fällt durch die Pupille ins Auge, wird durch die Linse gebündelt und trifft auf die Retina. Auf dieser befinden sich die sogenannten Zapfen (für das Farb-Sehen) und Stäbchen (für das Kontrast-Sehen), die das auftreffende Licht in elektrische Impulse umwandeln und über den Sehnerv an das Gehirn weiterleiten. Die Dichte beider Rezeptorarten ist auf der Retina ungleichmäßig verteilt, so dass zwischen drei Sichtbereichen (foveal, parafoveal und peripher) unterschieden werden kann (siehe Abb. 2.4).



**Abbildung 2.4:** Querschnitt durch das menschlichen Auge und dessen Sichtbereiche [154]

Die Fovea befindet sich im Zentrum des Sichtfelds, auf dem Schnittpunkt der Netzhaut und der zentralen Sehachse, und hat einen Kegelöffnungswinkel von  $2^\circ$ . Aufgrund der ausgeprägten Rezeptordichte ist hier die Sehschärfe am höchsten. In einem Bereich von einem Kegelöffnungswinkel von  $2^\circ$  bis  $10^\circ$  erstreckt sich der parafoveale Sichtbereich, in dem Farben, grobe Formen sowie Helligkeitsänderungen und Bewegungen gut wahrnehmbar sind. Im peripheren Sichtbereich außerhalb von  $10^\circ$  werden vor allem Bewegungen registriert. D. h. die Sehschärfe nimmt relativ zur Entfernung von einem fokussierten Objekt ab. Das gesamte Blickfeld – also der mit bewegten Augen bei unbewegtem Kopf sichtbare Bereich – erstreckt sich um ca.  $60^\circ$  nach links und rechts, sowie  $60^\circ$  nach oben und unten [58]. Im Fahrzeug stellt ein waagrechter Blick nach vorne die zentrale Sichtachse dar ( $0^\circ$ -Sichtlinie) [154]. Demnach bedeuten ein Blick ins HUD vier Grad, ein Blick ins Kombiinstrument und CID mindestens  $17^\circ$  Abweichung von der  $0^\circ$ -Sichtlinie nach unten. Somit befindet sich bei

einem Blick ins Kombiinstrument oder CID das Verkehrsgeschehen im peripheren Sichtfeld und wird mit 10 % der möglichen Sehschärfe wahrgenommen [113].

Durch die Änderung der Linsendicke und damit deren Brechkraft kann das Auge Objekte unterschiedlicher Entfernungen fokussieren. Der Vorgang des Scharfstellens wird Akkommodation genannt. Je weiter ein Objekt entfernt ist, desto weniger wird die Linse gekrümmt. Der unendliche Fokus ist ab einer Entfernung von 6 Metern erreicht. Das Kombiinstrument und CID befinden sich – je nach Fahrzeugtyp – in einem Abstand von ca. 0,5 bis 0,8 m, das projizierte Bild des HUDs in ca. 2,20 m Entfernung. Ein rascher Wechsel des Blicks zwischen dem CID und der Straße hat somit eine maximal mögliche Akkommodationszeit, da dies ein Wechsel zwischen dem unendlichen und nahen Fokus bedeutet. Dies kann bis zu 0,5 s dauern [58].

Blickbewegungen – also eine gezielte Ausrichtung der zentralen Sehachse auf bestimmte Objekte – werden durch die Muskulatur des Auges hervorgerufen. Die Augenbewegung kann entweder durch top-down oder bottom-up Mechanismen ausgelöst werden [64]. Bei top-down Prozessen wird der Fokus aufgrund einer internen Motivation willentlich auf einen Bereich gerichtet. Die interne Motivation kann hierbei auf Erfahrungswerten oder vorhandenem Wissen basieren. Wird die Blickrichtung durch externe Reize der Umwelt beeinflusst, liegt ein bottom-up Prozess vor. Bestimmte Objekte oder schnelle Bewegungen ziehen die Aufmerksamkeit auf sich, obwohl nicht bewusst nach ihnen gesucht wurde. Vor allem im peripheren Sichtfeld können Positions- und Intensitätsänderungen optischer Reize die visuelle Aufmerksamkeit binden [183] [29].

In der Medizin sind bis zu sechs Arten von Augenbewegungen definiert [84]. In dieser Arbeit wird ausschließlich zwischen Sakkaden und Augenfolgebewegungen unterschieden:

### **Sakkaden:**

Bei Sakkaden verschiebt sich das Abbild eines Objekts aus der Peripherie auf die Fovea. Somit besteht eine Sakkade aus einem ruckartigen Blicksprung zwischen zwei Fixationen (Sakkadendauer ca. 50 ms). Eine Fixation ist als ein Verweilen der Sehachse an einer Stelle zu verstehen. Laut DIN 15007 kann erst ab einer Fixationsdauer von 120 ms von einem „Blick“ gesprochen werden. Bei einer Sakkade kann das Auge kurzzeitig eine Drehgeschwindigkeit von bis zu 800° pro Sekunde annehmen, wobei die Seheindrücke währenddessen unterdrückt sind (Sakkadische Suppression). Erst bei Erreichen der Zielfixation wird das neue Objekt scharfgestellt (akkommodiert) [142].

### **Glatte Augenfolgebewegungen (smooth pursuit):**

Bei glatten Augenfolgebewegungen wird das Abbild eines sich bewegenden Objekts in der Fovea behalten. Das Auge folgt diesem Reiz nicht sprunghaft, sondern in einer fließenden Bewegung. Anders als bei Sakkaden besteht bei glatten Augenfolgebewegungen eine durchgehende Informationsaufnahme. Damit der Blick einer Bewegung folgen kann, ist entweder die Bewegungsgeschwindigkeit oder die Zykluszeit diskreter Einzelreize ausschlaggebend, denn das Auge nimmt ab einer bestimmten Geschwindigkeit aufeinanderfolgende Bilder nicht mehr einzeln, sondern als Teil- oder Scheinbewegung wahr [57]. Bei einer Zykluszeit zwischen 30 und 60 ms setzt die Teilbewegung (Phi-Bewegung), zwischen 60 und 200 ms

die Scheinbewegung (Beta-Bewegung) ein. In der Regel vergehen 100 bis 150 ms Latenzzeit, bis das Auge mit einer glatten Augenbewegung (smooth pursuit) oder Sakkade auf einen optischen Reiz reagiert [95].

### 2.3.2 Auditive Wahrnehmung

Neben dem visuellen Sinneskanal ist der auditive Sinneskanal eine wichtige Informationsquelle für Orientierung im Raum und Interaktion mit der Umwelt. Der Mensch nimmt akustische Reize in Form von Schallwellen mit den Ohren auf. Physikalisch gesehen ist Schall eine mechanische Welle in einem Medium, die sich je nach Temperatur und Druck in alle Richtungen mit der entsprechenden Schallgeschwindigkeit ( $c_{Luft} = 343 \text{ m/s}$  bei  $20^\circ \text{ C}$ ) ausbreitet. Da Schallwellen Druckschwankungen im Medium verursachen, wird die Stärke eines Schallereignisses durch den Schalldruckpegel  $L_p$  – englisch: Sound Pressure Level (SPL) – in Dezibel [dB] gemessen. Aufgrund der Anatomie des menschlichen Ohrs werden Schalldruckpegel über das hörbare Frequenzspektrum unterschiedlich laut wahrgenommen (siehe Hörschwelle in Abb. 2.5). Daher existieren in der Psychoakustik Maßeinheiten wie der Lautstärkepegel  $L$  [phon] und die Lautheit  $N$  [sone], die das subjektive Lautstärkeempfinden beschreiben. Für eine ausführliche Beschreibung dieser Maßeinheiten und weiterer Grundlagen aus dem Bereich der Psychoakustik sei an dieser Stelle auf einschlägige Literatur verwiesen (z. B. Erklärung: Isophone, A-, B-, C-Bewertung, Nah-, Frei- und Diffusfeld bei [45] [57]).

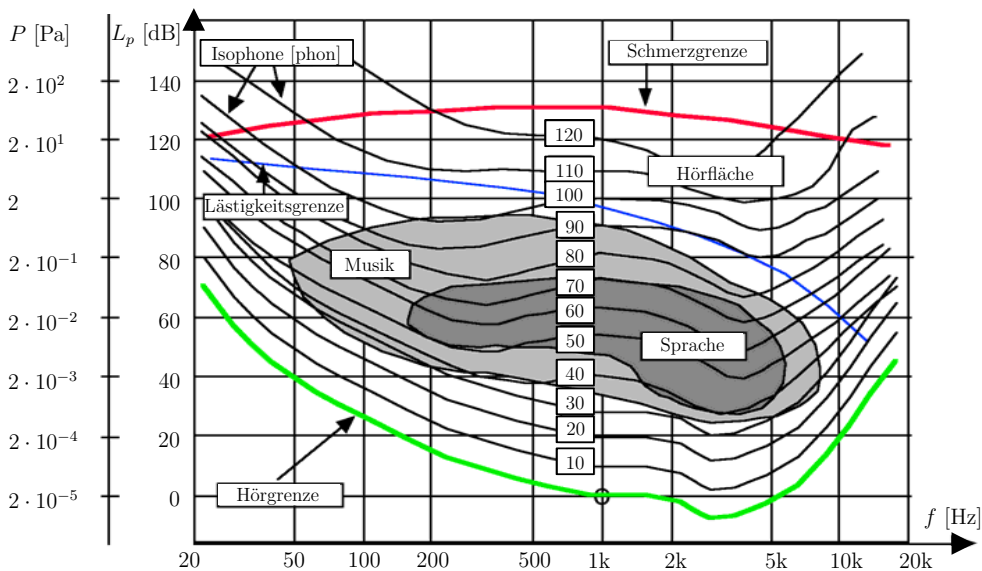


Abbildung 2.5: Hörbereich eines „normalhörenden“ Menschen [45]

Wie in Abbildung 2.5 dargestellt, wird der menschliche Hörbereich auf der Abszisse für niedrige Schalldrücke von der Hörschwelle – d. h. gerade noch hörbaren Schallereignissen – und für hohe Schalldrücke von der Schmerzschwelle eingegrenzt. Auf der Ordinate wird die Hörfläche von der tiefsten vom Menschen hörbaren Frequenz mit etwa 16 Hz und von der höchsten hörbaren Frequenz mit etwa 19 kHz begrenzt. Die Hörschwelle ist zwischen

2 kHz und 5 kHz am niedrigsten. In diesem Frequenzbereich hört der Mensch am besten (z. B. Sprachwahrnehmung).

Die Ortung akustischer Signale erfolgt weitgehend automatisch, bedarf jedoch einer komplexen Verarbeitung des an beiden Ohren einfallenden Schalls [13] [19]. Richtungs- und Entfernungshören sind zwei wichtige Bestandteile des räumlichen Hörens:

### **Richtungshören:**

Um die Richtung einer Schallquelle zu identifizieren, werden aus dem Schallsignal bi- und monaurale Richtungsparameter extrahiert. Bei den binauralen Parametern wird der Effekt genutzt, dass seitlich eintreffender Schall durch die Hindernischarakteristik der Kopfform unterschiedlich von beiden Ohren aufgenommen wird. Hierbei wird zwischen zwei Mechanismen unterschieden:

- **Interaurale Pegeldifferenzen** liegen vor, wenn bei seitlicher Beschallung an dem schallabgewandten Ohr ein niedrigerer Schalldruckpegel anliegt, als am schallzugewandten Ohr. Der Kopf bildet am schallabgewandten Ohr einen Schallschatten. Die Ausprägung des Schallschattens und somit der Pegelunterschiede ist richtungs- und frequenzabhängig. Für große Wellenlängen – sprich für niedrige Frequenzen – stellt der Kopf ein kleineres Hindernis dar, so dass geringe Interaurale Pegeldifferenzen auftreten. Kleine Wellenlängen – sprich hohe Frequenzen ( $> 1$  kHz) – werden am Kopf gebrochen oder reflektiert, so dass höhere Pegeldifferenz entstehen. Die interaurale Pegeldifferenz steigt mit der Frequenz (z. B. bei  $90^\circ$  Einfallswinkel: ca. 20 dB  $\Delta$  SPL bei 1kHz und ca. 2 dB  $\Delta$  SPL bei 250 Hz).
- **Interaurale Zeitdifferenz** entsteht, weil die Schallwellen zum schallabgewandten Ohr einen weiteren Weg zurücklegen müssen als zum schallnahen Ohr. Der Schall erreicht das abgewandte Ohr zeitlich verzögert. Der Mensch kann Zeitdifferenzen von minimal 10 Mikrosekunden auflösen [45]. Über die Zeitdifferenz kann nicht immer eindeutig die Richtung der Schallquelle bestimmt werden, da es mehrere Punkte im Raum mit gleicher interauraler Zeitdifferenz gibt (z. B. vorne-links und hinten-rechts). Um eindeutige Richtungsinformationen zu erhalten, reichen kleine, meist vom Menschen unbewusst durchgeführte Kopfbewegungen aus, um über die Veränderung der Zeitdifferenz eine eindeutige Lokalisierung zu erhalten.

Schall, der direkt von vorn, hinten oder oben auf den Kopf trifft, wird an den Ohren gleich gebrochen und liefert keine binaurale Richtungsinformation. In diesem Fall erfolgt eine Lokalisation über monaurale Richtungsparameter. Der Schall wird abhängig von der Richtung unterschiedlich am Kopf und der speziellen Form der Ohrmuschel reflektiert (mathematisch beschrieben durch die Head-Related-Transfer-Functions, HRTF). Hierbei werden sogenannte richtungsabhängige Frequenzbänder in ihrer Amplitude stärker beeinflusst als andere. Blauert [171] hat diese in einem Hörexperiment identifiziert. Demnach konnten die Probanden Schall von hinten mit einer Frequenz um die 1 kHz und 14 kHz, von oben mit einer Frequenz um die 8 kHz, und von vorne mit einer Frequenz unterhalb von 1 kHz und zwischen 2 und 5 kHz am häufigsten zuordnen (siehe Häufigkeit korrekter Richtungszuordnungen in Abb. 2.6).

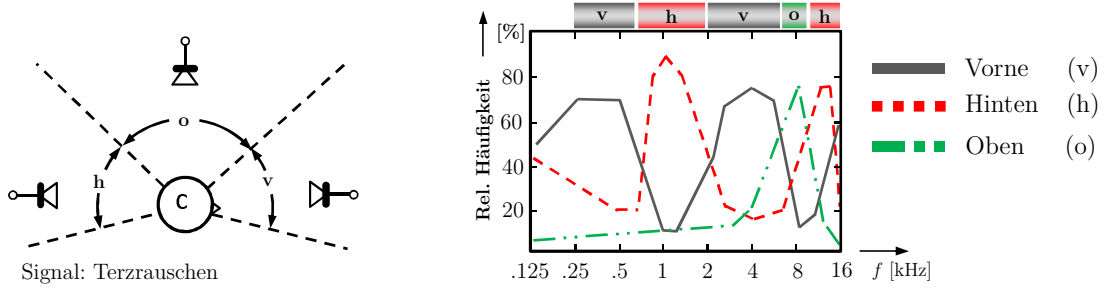


Abbildung 2.6: Richtungsbestimmende Frequenzbänder [171]

### Entfernungshören:

Über die auditive Wahrnehmung kann nur recht mangelhaft die Entfernung zu einer Schallquelle bestimmt werden. Dennoch können aus folgenden Parametern Entfernungsinformationen extrahiert werden:

- Schalldruckpegel am Abhörort: Im Freifeld sinkt der Pegel um 6 dB SPL pro Entfernungsverdopplung laut dem  $1/r$ -Gesetz (bzw. im Nahfeld das  $1/r^2$ -Gesetz,  $r$  ist der Abstand zur Schallquelle)
- Frequenzspektrum: Mit zunehmender Entfernung werden hohe Frequenzen stärker von der Luft absorbiert als tiefe
- Schalldruckpegel-Verhältnis aus Direkt- und Diffusschall: Der Schalldruckpegel des Direktschalls (Schall, der direkt als erstes am Hörer eintrifft) nimmt mit der Entfernung ab. In reflektierender Umgebung bleibt der Diffusschallpegel (Schallwellen aufgrund von Reflexionen) jedoch konstant
- Interaurale Pegeldifferenzen: Im Nahfeld werden aus der Hörerfahrung interaurale Pegeldifferenzen zur Entfernungsschätzung verwendet

Bei bekannten Klängen wird der Schalldruckpegel mit einem im Gedächtnis gespeicherten Wert verglichen und hieraus die Entfernung der Schallquelle geschätzt. Bei unbekanntem Schallereignissen ist noch nicht eindeutig geklärt, inwieweit alle oben beschriebenen Faktoren eine Rolle spielen. Jedoch haben nach Zahorika [185] der Schalldruckpegel und der Direktschallanteil den größten Einfluss auf das Entfernungshören.

## 2.4 Zusammenfassung

Die Fahraufgabe kann in die primäre, sekundäre und tertiäre Fahraufgabe unterteilt werden. Feldversuche haben gezeigt, dass Autofahrer sich während der Fahrt häufig mit Tertiär-Aufgaben beschäftigen und dies einen negativen Einfluss auf die primäre Fahraufgabe haben kann. Daher gilt der Fahrerzustand, bei dem der Fahrer während einer Tertiärinteraktion visuell vom Fahrgeschehen abgewendet ist (hier: Blick ins CID), als ein zentraler Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit. Eine weitere Unterteilung der primären



Fahraufgabe in Navigation, Bahnführung und Stabilisierung beschreibt das Drei-Ebenen-Modell von Donges. Bei diesem Modellansatz werden auf jeder Ebene unterschiedliche Fähigkeiten und mentale Ressourcen vom Fahrer benötigt. Wie viel und welche Art von mentalen Ressourcen der jeweiligen Aufgabe zugeordnet werden, hängt von individuellen Faktoren ab (z. B. Erfahrung). Prinzipiell soll die Verarbeitung der in dieser Arbeit entwickelten Assistenzkonzepte geringe mentale Ressourcen benötigen und somit fertigungs- oder regelbasiertes Verhalten des Fahrers hervorrufen. Die hierbei ablaufende Informationsaufnahme und -verarbeitung kann mit Hilfe der drei Modellansätze Stufen-, Ressourcen- und Hybridmodell beschrieben werden. Alle Ansätze haben gemein, dass die mentalen Ressourcen begrenzt sind. Die Stufenmodelle haben in dieser Arbeit eine zentrale Bedeutung, da sie von sequenziell ablaufenden Verarbeitungsprozeduren ausgehen, die Zeit in Anspruch nehmen. Auf Grundlage dieser Stufenmodelle kann mit Hilfe eines Reaktionszeitmodells der Effekt der hier entwickelten Assistenzkonzepte auf die einzelnen Phasen des Informationsverarbeitungsprozesses analysiert werden (siehe OODA-Loop). Für die Informationsaufnahme ist die visuelle Wahrnehmung die wichtigste Informationsquelle beim Autofahren. Zur Steuerung der visuellen Aufmerksamkeit existieren top-down- und bottom-up-Prozesse. Hierbei kann die Ausrichtung der zentralen Sehachse durch Sakkaden – also ruckartige Blicksprünge – oder glatte Augenfolgebewegungen erfolgen. Auch die auditive Wahrnehmung stellt eine wichtige Informationsquelle für die Orientierung im Raum dar. So kann die Richtung einer Schallquelle über interaurale Pegel- und Zeitdifferenzen oder über monaurale Richtungsparameter bestimmt werden. Die Frequenz der Schallwellen hat hierbei einen entscheidenden Einfluss auf die Ortung einer Schallquelle.



---

### Ableitung der Anforderungen an Warn- und Informationskonzepte

---

Um neuartige Warn- und Informationskonzepte für Fahrerassistenzsysteme zu entwickeln, ist eine Bestandsaufnahme der etablierten Mensch-Maschine-Schnittstelle von FAS erforderlich. Dazu werden zu Beginn mehrere Klassifikationsansätze von Fahrerassistenzsystemen aufgezeigt, der für diese Arbeit relevante Ansatz abgeleitet und auf bestehende Systeme angewendet. Anschließend werden neben den etablierten Anzeigetechnologien kurz geltende Gestaltungsrichtlinien für Warn- und Informationsausgaben beschrieben und hieraus die relevanten Gestaltungsaspekte abgeleitet. Darüber hinaus werden die Einflüsse bestimmter Gestaltungsaspekte auf die Fahrerreaktion anhand empirischer Befunde zusammengefasst. Zuletzt werden die Schwächen der etablierten Mensch-Maschine-Schnittstelle von FAS sowohl für die Längs- als auch Querführung analysiert, die für diese Arbeit relevanten Anwendungsfälle spezifiziert und hieraus Anforderungen an die Warn- und Informationskonzepte abgeleitet.

#### 3.1 Systematisierung von Fahrerassistenzsystemen

Wie in Kapitel 1.2 gezeigt wurde, bestehen zwei unterschiedliche Ausprägungsformen von Fahrerassistenzsystemen: die Sicherheits- und die Komfortsysteme. Ein weit verbreiteter Klassifikationsansatz wurde von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) gemeinsam mit Vertretern der Wissenschaft, der Automobil- und der Zulieferindustrie vorgenommen [52]. Dieser orientiert sich an dem Grad der Unterstützung und unterteilt das Spektrum der Fahrerassistenz in manuelles, assistiertes, teilautomatisiertes, hochautomatisiertes und

vollautomatisiertes Fahren. Diese Einteilung eignet sich jedoch primär für Komfortsysteme, die über einen längeren Zeitraum kontinuierlich wirken, und weniger für kurzzeitig wirkende Sicherheitssysteme, wie sie Gegenstand dieser Arbeit sind.

Zur Klassifizierung von Sicherheitssystemen kann die Einteilung von Braess und Donges [21], die zwischen zwei Arten unterscheidet, verwendet werden:

- Informations- und Warnsysteme, die im Bereich von Sekunden vor der kritischen Verkehrssituation auf der Bahnführungsebene wirken, und
- Eingreifende Systeme, die im Bereich von einer Sekunde vor der kritischen Verkehrssituation sowohl auf der Bahnführungs- als auch der Stabilisierungsebene wirken

Die hierfür verwendeten Ausgabetypen – Information, Warnung und Eingriff – sind wie folgt definiert [21] [139] [172]:

#### **Information:**

Eine Information unterstützt den Fahrer bei Wahrnehmungsunsicherheiten. Die Interpretation dieser Informationen ist jedoch Aufgabe des Fahrers. Ein Beispiel hierfür sind Nachsichtsysteme, bei denen unter anderem Fußgänger in einem stärkeren Kontrast auf einem Bildschirm dargestellt werden. Der Fahrer muss diese Information selbstständig als potentielle Gefahr identifizieren.

#### **Warnung:**

Eine Warnung stellt die interpretierte Form der Information dar, da sie die Kritikalität einer Verkehrssituation beinhaltet. Sie wird somit nur ausgegeben, wenn eine kritische Verkehrssituation vorliegt und eine Handlung des Fahrers zur Unfallvermeidung erforderlich ist. Ein Beispiel ist das optische Warnsymbol der Auffahrwarnung im Kombiinstrument und HUD.

#### **Eingriff:**

Bei einem Eingriff werden kurzzeitig entweder Teile der Längs- oder Querführung übernommen. Dies reicht von einer motorischen Unterstützung des Fahrers bis zu einem selbstständigen Agieren des Systems. Dies kann z. B. die Verstärkung des Bremsdrucks bei einer zu schwachen Pedalberührung bzw. ein Abbremsen oder ein Lenken bei Kollisionsgefahr sein.

Um sowohl Komfort- als auch Sicherheitssysteme in das gesamte Spektrum der Fahrerassistenz einordnen zu können, wird hier der Klassifikationsansatz von Ehmanns et al. [39] und Gründl [61] verwendet. Hierbei werden Fahrerassistenzsysteme sowohl nach dem Grad der Unterstützung – informierend, warnend, eingreifend und vollständig übernehmend – als auch nach der zugehörigen Ebene der Fahraufgabe systematisiert. In Tabelle 3.1 wird dieser Ansatz auf aktuelle Fahrerassistenzsysteme angewendet. Da Komfortsysteme kein Bestandteil dieser Arbeit sind, beziehen sich die Begriffe „Fahrerassistenzsystem“ oder „Assistenzsystem“ im weiteren Verlauf dieser Arbeit ausschließlich auf Sicherheitssysteme.

Grad der Fahrerunterstützung	Navigationsebene	Führungsebene	Stabilisierungsebene
<b>Information</b>	Navigationssystem Stau-Info	Night Vision Adaptives Kurvenlicht, Abstands-Info Verkehrszeichen-erkennung	
<b>Warnung</b>		Auffahrwarnung Spurwechselwarnung Aufmerksamkeitsassistent	Spurverlassenswarnung (mit Lenkradvibration)
<b>Korrigierender Eingriff</b>			Spurverlassenswarnung (mit Lenkeingriff) Auffahrwarnung mit Bremsfunktion
<b>Übernahme der Fahraufgabe</b>	Vollautomatisiertes Fahren	Teil- & Hochautomatisiertes Fahren	Notbremsassistent Autonomes Ausweichen

**Tabelle 3.1:** Einteilung aktueller Fahrerassistenzsysteme nach dem Grad ihrer Unterstützung und der Ebene der Fahraufgabe [39] [61]

## 3.2 Ausgabekanäle von Fahrerassistenzsystemen

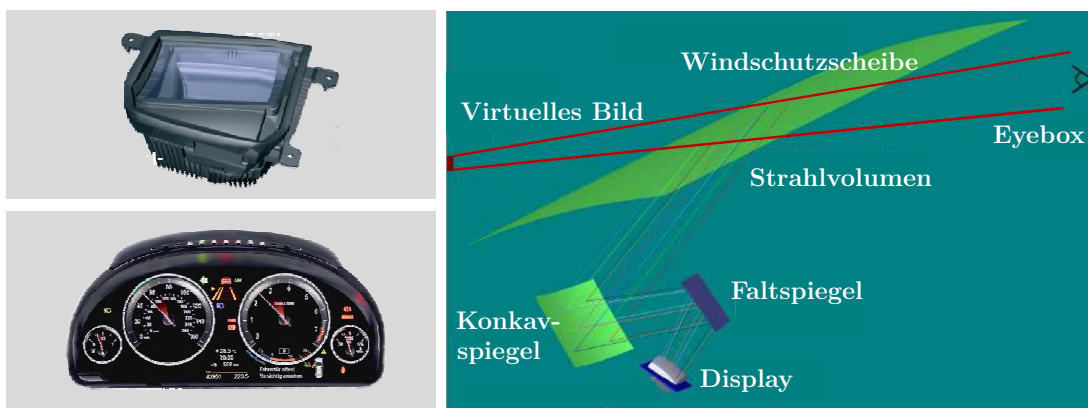
Assistenzsysteme können über die optische, akustische oder haptische Modalität mit dem Fahrer interagieren. Zum Beispiel gehören Warnsymbole im Kombiinstrument oder HUD zur optischen, Warntöne zur akustischen und Lenkradvibrationen zur haptischen Modalität. Besteht eine Assistenzausgabe aus einer einzigen Modalität, so wird von Unimodalität gesprochen. Sind dagegen mehrere Modalitäten an einer Assistenzausgabe beteiligt, so wird dies als Multimodalität bezeichnet. Im Folgenden werden Ausgabetechnologien für die optische und akustische Modalität näher beschrieben. Da haptische Warnmeldungen kein Gegenstand dieser Arbeit sind, wird an dieser Stelle auf entsprechende Veröffentlichungen verwiesen (z. B. haptischer Sitz [151] [47] [46]).

### 3.2.1 Optische Ausgabetechnologien

Bis in die 1980er Jahre stand dem Fahrer ausschließlich das Kombiinstrument zur Überwachung fahrrelevanter Informationen oder bestimmter Betriebszustände zur Verfügung. In modernen Fahrzeugen der Oberklasse haben sich mittlerweile drei Anzeigebereiche, nämlich das Head-Up Display, das Kombiinstrument und das Central Information Display, etabliert [179].

#### Head-Up Display (HUD):

Mit dem HUD können Anzeigen in das Sichtfeld des Fahrers projiziert werden. Der bei BMW eingesetzte HUD-Verbund besteht aus einem Thin-Film-Transistor (TFT) Display, einer LED Leuchtquelle, einem Umlenkspiegel und einer Gehäuseabdeckung (siehe Abb. 3.1). Das im TFT Display angezeigte Bild wird über einen Spiegel gefaltet und über den gekrümmten Umlenkspiegel in die Windschutzscheibe projiziert. Das virtuelle Bild erscheint ungefähr auf Höhe der Frontstoßstange und ist innerhalb der sogenannten Eyebox sichtbar. Die Eyebox ist der Bereich, in dem die Lichtstrahlen des strahlenoptisch umgelenkten TFT-Bildes verlaufen. Das HUD der aktuellen BMW 7er Serie hat im Bereich des Fahrerkopfs eine Eyebox mit einer Ausdehnung von ca. 20 x 10 cm (Breite x Höhe) [113].



**Abbildung 3.1:** HUD und Kombiinstrument von BMW (links, Quelle Bilder: Internet), Strahlengang des HUDs [113] (rechts)

#### Kombiinstrument (KI):

Vor der zunehmenden Elektrifizierung bestanden Kombiinstrumente hauptsächlich aus mechanischen Bauelementen wie Zeigern, Zifferblatt und Kammerleuchten. Durch den Einsatz von TFT-Displays geht der Trend zum frei programmierbaren Kombiinstrument [147]. Hierdurch sind der Gestaltung von Warn- und Informationsausgaben bezüglich Anzeigeort, -größe und Geometrie kaum Grenzen gesetzt.

#### Central Information Display (CID):

Das CID ist ein Liquid-Crystal-Display (LCD), das sich in der Mitte der Instrumententafel (I-Tafel) befindet. Je nach Hersteller kann es eine Bildschirmdiagonale von bis zu 10,25 Zoll haben. Im CID werden überwiegend Navigations- und Entertainmentfunktionen dargestellt (eine Ausnahme ist das Night-Vision der aktuellen BMW 7er Serie).

### 3.2.2 Akustische Ausgabetechnologien

Fahrzeuge der Oberklasse haben mittlerweile HiFi-Systeme mit einer 7.2 Surround-Anordnung. Zum Beispiel sind bei der aktuellen 7er Serie von BMW insgesamt sieben Mitten- und Hochtöner, sowie zwei Tieftöner um den Fahrer herum angeordnet (siehe Betriebsanleitung [15]). Diese Lautsprecheranordnung ermöglicht die Ortung räumlich gerichteter Schall-Signale. Entfernungshören ist hierbei nur bedingt möglich [16].

## 3.3 Gestaltung von Assistenz

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen der MMS-Gestaltung von Assistenzsystemen beschrieben. Der Fokus liegt auch hier ausschließlich auf optischen und akustischen Assistenzausgaben. Zum Verständnis werden zunächst wichtige Begriffe aus dem Gebiet der Fahrerassistenz-Entwicklung erläutert [89]:

### **Falschwarnung:**

Bei dem heutigen Stand der Technik kann es vorkommen, dass Sensoren zu sensibel auf unkritische Objekte oder Gegenstände im Fahrzeugumfeld reagieren und Falschwarnungen ausgelöst werden. Aus technischer Sicht wird das Warnsignal aufgrund von Schwellwertüberschreitungen korrekterweise ausgelöst, der Fahrer hingegen empfindet das Systemverhalten als unverständlich und fehlerhaft.

### **Fehlwarnung:**

Gibt ein Assistenzsystem in einer kritischen Verkehrssituation keine Warnung aus, obwohl es laut Systemdefinition erforderlich ist, so wird von einer Fehlwarnung gesprochen. Dies tritt vor allem bei einer zu „konservativen“ Sensorauslegung auf. Um die Wahrscheinlichkeit von Falschwarnungen gering zu halten, sind Erkennungsschwellen von Objekten so hoch angesetzt, dass Objekte im Umfeld seltener als kritisch klassifiziert werden. Eine große Herausforderung in der Sensor- und Funktionsauslegung ist es daher, Erkennungsschwellen so zu definieren, dass wenig Falsch- und Fehlwarnungen vorkommen.

### **Wirksamkeit:**

Die Wirksamkeit beschreibt das Maß an Effektivität eines Assistenzsystems im Nutzfall. Hierbei kann zwischen der objektiven und subjektiven Wirksamkeit unterschieden werden [70]. Die objektive Wirksamkeit kann durch Messung des Fahr- oder Blickverhaltens in Simulator- oder Realfahrzeugstudien bestimmt werden. Zum Beispiel können verschiedene MMS-Konzepte einer Auffahrwarnung anhand der Bremsreaktionszeit quantitativ miteinander verglichen werden. Bei der subjektiven Wirksamkeit beurteilen Probanden das Maß an Effektivität anhand der persönlichen Wahrnehmung (z. B. per Fragebogen).

### **Verzeihlichkeit:**

Die Verzeihlichkeit beurteilt den Grad der Entschuldbarkeit einer Falschwarnung. Die Verzeihlichkeit kann in Probandenstudien subjektiv per Fragebogen bewertet werden [70].

### 3.3.1 Gestaltungsaspekte

Im Forschungsprojekt AIDE wurden unterschiedliche Dimensionen zur Gestaltung von Assistenzausgaben definiert (siehe zweite Spalte von links in Tab. 3.2). Diese Dimensionen sind jeweils einer festen Modalität zugeordnet (z. B. Farbe  $\hat{=}$  optische Modalität und Lautstärke  $\hat{=}$  akustische Modalität). Im späteren Verlauf dieser Arbeit werden modalitätsunabhängige Dimensionen benötigt, weshalb vier Hauptgestaltungsmerkmale abgeleitet werden (siehe dritte Spalte von links in Tab. 3.2).

Modalität	Dimensionen nach AIDE	Hauptgestaltungsmerkmale
1. Optisch	Größe, Helligkeit, Kontrast	Reizintensität
	Symbol, Text, Farbe	Konfliktspezifität
	Ausgabeort	Richtungs- und Entfernungsspezifität
	Ausgabedauer, Blinkfrequenz	Dynamik
2. Akustisch	Lautstärke, Frequenz, Verdeckung/Kontrast,	Reizintensität
	Musikalität, Sound-Art (Warnton, Auditory Icon)	Konfliktspezifität
	Ortbarkeit	Richtungs- und Entfernungsspezifität
	Ausgabedauer, Pulsierend	Dynamik
3. Haptisch	Intensität (Vibrationsstärke)	Reizintensität
	Vibration, Kraft	Konfliktspezifität
	Ausgabeort, Richtung	Richtungs- und Entfernungsspezifität
	Ausgabedauer, Pulsierend	Dynamik

**Tabelle 3.2:** Warn-Modalitäten und deren Gestaltungsdimensionen, sowie die hieraus abgeleiteten Hauptgestaltungsmerkmale [182]

Demnach können Assistenzausgaben nach den Hauptgestaltungsmerkmalen Reizintensität, Konfliktspezifität, Richtungs- und Entfernungsspezifität, sowie der Dynamik beschrieben werden [115]. Im Folgenden werden diese Hauptgestaltungsmerkmale anhand von Beispielen sowohl für die optische als auch akustische Modalität näher beschrieben:

**Reizintensität:**

Die Reizintensität gibt die physikalisch messbare Intensität einer Warn- und Informationsausgabe an. Ein physikalisches Maß für die Reizintensität optischer Ausgaben ist zum Beispiel die Lichtstärke  $I_v$ , gemessen in Candela [cd]. Beeinflusst wird die Lichtstärke u. a. durch die Größe oder Helligkeit einer optischen Anzeige. Die Reizintensität akustischer Rückmeldungen kann zum Beispiel über den Schalldruckpegel  $L_p$  [dB] gemessen werden.

**Konfliktspezifität:**

Die Konfliktspezifität ist ein Maß für den Informationsgehalt einer Assistenzausgabe. In der Fahrerassistenzforschung fällt in diesem Zusammenhang häufig der Begriff „Master“- und „Single“-Alarm [163] [116]. Master-Alarm bedeutet hier, eine für möglichst viele Situationen geltende Warn- und Informationsausgabe (d. h. Konfliktunspezifisch). Ein Single-Alarm bezieht sich dagegen auf eine spezielle Konfliktsituation (d. h. Konfliktspezifisch). So gilt z. B. eine optische Ausgabe in Form eines roten Warndreiecks als konfliktunspezifisch. Der Fahrer bekommt lediglich den Hinweis auf eine bevorstehende Gefahr. Dagegen ist ein Fußgänger-Warnsymbol konflikt-spezifisch, da hier zusätzlich ein Hinweis auf die Art der Konfliktsituation gegeben wird. Bei akustischen Ausgaben gilt z. B. ein hochfrequenter Sinus-Ton als konfliktunspezifisch. Dagegen sind sogenannte „Auditory Icons“ konflikt-spezifisch. Diese sind aus der alltäglichen Interaktion mit der Welt entnommene Geräusche und von Kindheit an erlernt [48]. Ein Beispiel hierfür ist das Geräusch einer Autohupe.



#### **Richtungs- und Entfernungsspezifität:**

Die Richtungs- und Entfernungsspezifität gibt an, wie viel räumliche Information in einer Warn- oder Informationsausgabe enthalten ist. Da die hier entwickelten Assistenzausgaben eine schnelle und automatisch ablaufende Ausrichtung der Aufmerksamkeit in die Richtung der Gefahr bewirken sollen, wird im Folgenden ausschließlich auf die Richtungsspezifität eingegangen. Auf zwei Arten kann dem Fahrer die Richtung einer bevorstehenden Gefahr vermittelt werden:

- **Ortsreferenziert:** Die Ausgabe erfolgt über eine entsprechende Ausgabetechnologie an einem festen Ort im Fahrzeug (z. B. HUD, CID). Die Richtungsinformation ist in der Warn- und Informationsausgabe enthalten (z. B. Pfeil). Die Aufmerksamkeitssteuerung erfolgt top-down
- **Objektreferenziert:** Die Ausgabe erfolgt aus der Richtung der Gefahr und ist unabhängig von der Ausgabetechnologie. Die Aufmerksamkeitssteuerung erfolgt bottom-up

Beispiele für ortsreferenzierte Ausgaben sind die von Fuerstenberg et al. [51] vorgestellten Warnsymbole für einen Kreuzungsassistenten. Das im HUD ausgegebene Warnsymbol enthält Richtungspfeile, die dem Fahrer anzeigen, aus welcher Richtung die Kollision droht. Ortsreferenzierte akustische Ausgaben sind zum Beispiel räumlich ungerichtete „Verbale Ausgaben“, die dem Fahrer die Richtung der Gefahr ansagen (z. B. Achtung! Fahrzeug von rechts). Beispiele für objektreferenzierte Ausgaben sind zum Beispiel kontaktanaloge Anzeigen [150]. Hierbei wird die Realität mit virtuellen Anzeigen überlagert oder verstärkt. Der Fahrer muss keinen Bezug mehr zwischen einer abstrakten Anzeige und der Fahrsituation herstellen [125]. Objektreferenzierte akustische Ausgaben sind räumlich gerichtete Hinweise, die über das Hifi-System aus der Richtung der Gefahr ausgegeben werden [163].

#### **Dynamik:**

Die Dynamik beschreibt die Eigenschaftsänderung einer Warn- und Informationsausgabe über die Zeit. Dieses Merkmal ist als übergeordneter Gestaltungsparameter bezüglich der Reizintensität, Konflikt- und Richtungsspezifität zu verstehen. Zum Beispiel ist das Blinken eines Warnsymbols eine dynamische Änderung der Reizintensität über die Zeit.

### **3.3.2 Gestaltungsziele**

In der Literatur lassen sich zahlreiche Gestaltungsziele für Warn- und Informationsausgaben finden (z. B. [182] [36] [76] [77]). Beispiele für Gestaltungsziele sind unter anderem „Warnung sollten den Fahrer über Gefahren informieren“ und „einen Hinweis auf den Ort der Gefahr bieten“ [182]. Die hieraus für diese Arbeit angepassten Gestaltungsziele werden wie folgt definiert:

1. Eine Assistenzausgabe sollte die Entdeckungswahrscheinlichkeit von potentiellen Gefahren erhöhen

2. Eine Assistenzausgabe sollte zu einer Verkürzung von Entscheidungs- und Handlungsprozessen führen (z. B. kürzere Bremsreaktionszeit)
3. Eine Assistenzausgabe sollte die Qualität der Handlung verbessern (z. B. Vermeidung eines fahrdynamischen Grenzbereichs in Ausweichsituationen)

Inwieweit eine Assistenzausgabe die hier definierten Gestaltungsziele erfüllt, kann beispielsweise mit Hilfe von Probandenstudien im Fahr Simulator oder Realfahrzeug bewertet werden [71] [49]. Durch Messung von Reaktionszeiten kann der Erfüllungsgrad der Gestaltungsziele quantitativ analysiert werden. Dies kann zum Beispiel die Zeitdauer vom Zeitpunkt der Warnausgabe bis der Fahrer auf die Gefahr blickt, das Bremspedal berührt oder ein bestimmtes Lenkmanöver einleitet. Eine ausführliche Beschreibung der für diese Arbeit erforderlichen Bewertungsmetriken erfolgt in Kapitel 5 und 6.

Welchen Einfluss die zuvor beschriebenen Hauptgestaltungsmerkmale auf die Gestaltungsziele haben, wird im Folgenden anhand ausgewählter empirischer Befunde dargestellt. Der Hauptgestaltungsparameter Reizintensität wird nicht näher beschrieben. Eine ausführliche Beschreibung physikalischer Grenzwerte zur Wahrnehmbarkeit von Warnmeldungen ist in der entsprechenden Fachliteratur zu finden (z. B. [65] [149] [57]).

#### **Einfluss der Konfliktspezifität:**

Thoma [163] untersuchte in seiner Arbeit den Einfluss der Konfliktspezifität auf die Fahrerreaktion. Hierfür verglich er optische Warnausgaben mit hoher und niedriger Konfliktspezifität (z. B. Fußgänger- gegenüber Warndreiecksymbol). Hierbei konnte kein Vorteil der konfliktspezifischen gegenüber der konfliktunspezifischen Ausgabe nachgewiesen werden. Den Einfluss der Konfliktspezifität bei akustischen Rückmeldungen untersuchten Cummings et al. [28]. Es wurden unspezifische und spezifische Warntöne in Auffahr- und Spurverlassenssituationen miteinander verglichen (z. B. Sinus-Ton gegenüber „Nagelbandrattern“ des Fahrbahnrandes). Auch hier konnten keine Unterschiede zwischen den Reaktionszeiten festgestellt werden (siehe auch Ho und Cummings [66]). Im Gegensatz dazu konnte Fricke [48] in ihrer Arbeit Reaktionszeitunterschiede zwischen spezifischen „semantisch angereicherten“ und unspezifischen Warntönen feststellen. Zum Beispiel bremsen Fahrer bei einem Fahrradklingel-Geräusch schneller als bei einem Sinus-Warnton.

#### **Einfluss der Richtungsspezifität:**

Ho und Spence [68] untersuchten den Einfluss der Richtungsspezifität auf die Fahrerreaktion. Optische, akustische und haptische Reize, die einen Hinweis auf die Richtung der Gefahr gaben, führten demnach zu kürzeren Reaktionszeiten als richtungsunspezifische Reize. Allein für die akustische Modalität wurde in zahlreichen Grundlagenuntersuchungen der Vorteil der objektreferenzierten Richtungsspezifität nachgewiesen (siehe [110] [67] [68] [8] [9] [122] [18] [30] [163]). Ein räumlich gerichteter akustischer Hinweisreiz ist demnach stark aufmerksamkeitsbindend und führt zu kürzeren Reaktionszeiten als ungerichtete Reize. Ho und Spence [67] haben außerdem die Wirksamkeit ortsreferenzierter akustischer Ausgaben untersucht. Hierbei erhielten die Fahrer ungerichtete, aber semantische angereicherte Hinweisreize, die durch Sprachausgaben die Richtung der Gefahr andeuteten („vorne“, „hinten“). Wie bei den objektreferenzierten Ausgaben bewirkte die Richtungsinformation

im Vergleich zu Warnungen ohne Richtungsinformation kürze Reaktionszeiten, wobei die Fahrer weniger akkurat reagierten (z. B. schreckhafte Reaktion).

#### **Einfluss der Dynamik:**

In der Fahrerassistenzforschung lassen sich relativ wenig empirische Befunde zur Dynamik finden. Dies lässt sich dadurch begründen, dass Assistenzausgaben relativ kurz erfolgen, weshalb die Änderung einer Ausgabe über diesen kurzen Zeitraum nicht immer sinnvoll erscheint. Poitschke et al. [126] haben in einer Fahrsimulatorstudie dynamisch bewegte Hinweisreize optischer und akustischer Modalität untersucht. Der optische Reiz bewegte sich jedoch nicht in Richtung der Gefahr (vgl. Kap. 5) sondern innerhalb eines Displays vom Anzeigort einer Nebenaufgabe (obere Hälfte des Displays) in Richtung eines Warnsymbols (untere rechte Ecke des Displays). Hierbei konnten keine signifikanten Reaktionszeitunterschiede gegenüber einem unbewegten Reiz festgestellt werden. Bei der akustischen „Animation“ wurde die Richtung von sowohl schmal- als auch breitbandigen Geräuschen verändert. Dies hatte einen stärkeren Effekt auf die Reaktionszeit als die optischen bewegten Hinweisreize. Kuhn-Rahloff et al. [98] untersuchten ebenfalls dynamische Änderungen von akustischen Warnungen. Es wurde gezeigt, dass Probanden durch einen Doppler Effekt – also die Veränderung der Frequenz in Abhängigkeit von der Relativgeschwindigkeit einer Schallquelle – schneller reagierten und die Relativgeschwindigkeit vorbeifahrender Fahrzeuge besser einschätzen konnten.

#### **Einfluss von Multimodalität:**

Zu multimodalen Ausgaben, die aus einer zeitgleichen optischen und akustischen Rückmeldung bestehen, existieren zahlreiche empirische Befunde. So bewirkt die Zunahme akustischer Reize zur Informationsaufnahme schnellere Reaktionszeiten (vgl. Redundant signals effect, RSE [32]), eine höhere Entdeckungswahrscheinlichkeit der Reize [73] und geringere Fehlerraten (z. B. bei komplexen Aufgaben [170]).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass keine empirischen Befunde gefunden werden konnten, die einen Einfluss der Konfliktspezifität auf das Fahrverhalten nachweisen. Eine Ausnahme sind jedoch Auditory Icons, bei denen ein positiver Effekt auf die Reaktionszeit nachgewiesen wurde. Jedoch ließen sich hier widersprüchliche Ergebnisse in der Literatur finden. Eindeutig sind dagegen die Befunde im Bezug auf die Richtungsspezifität und Dynamik. Hierbei waren überwiegend positive Effekte auf die Reaktionszeit bei Warnmeldungen mit hoher Richtungsspezifität und Dynamik zu finden. Dennoch haben alle aufgeführten Befunde gemein, dass es sich um zeitkritische – also späte und akute – Warnausgaben handelt. Inwieweit sich diese Befunde auf Warn- und Informationsausgaben in der frühen Phase kritischer Verkehrssituationen übertragen lassen, ist unklar.

### **3.4 Warn- und Informationsstrategien**

Die meisten Assistenzsysteme unterstützen den Fahrer durch mehrere Ausgabetypen (Information, Warnung und Eingriff), die je nach Eskalationsstrategie nacheinander ausgegeben werden. Im Folgenden wird beschrieben, wie die einzelnen Ausgabetypen in eine stimmige Warn- und Informationsstrategie integriert werden können.

### 3.4.1 Kenngrößen zur Situationsinterpretation

Um die Kritikalität einer Verkehrssituation zu bewerten, benötigen Assistenzsysteme eine abstrakte Beschreibung der Umwelt durch entsprechende Kenngrößen. Anhand dieser können entsprechende Warnstufen ausgelöst werden. Zwei häufig verwendete Kenngrößen werden an dieser Stelle kurz beschrieben. Für eine ausführliche Herleitung sei an dieser Stelle auf die Literatur verwiesen (z. B. [92] [108]).

#### **Time-to-Collision (TTC):**

Die TTC ist die Zeit bis zum Zusammenstoß zweier Fahrzeuge, die sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten annähern. Mit der Annahme stationärer Geschwindigkeiten berechnet sich die TTC vereinfacht aus dem Quotienten des Abstandes ( $d$ ) und der Differenzgeschwindigkeit ( $\Delta v$ ):

$$TTC = \frac{d}{\Delta v} \quad [s] \quad (3.1)$$

Mit Berücksichtigung instationärer Geschwindigkeiten gehen in die TTC-Berechnung zusätzlich die Eigengeschwindigkeit, -beschleunigung, sowie die Geschwindigkeit und Beschleunigung des möglichen Kollisionsobjekts ein (Herleitung und Gleichung siehe [92]). Die TTC wird bei Assistenzsystemen der Längs- und Querverführung als Auslösekriterium von Warnausgaben verwendet (z. B. bei der Auffahrwarnung bzw. Spurwechselwarnung).

#### **Time-to-Line-Crossing (TLC):**

Die TLC definiert die Zeit, nach der der Fahrzeug-Schwerpunkt eine der beiden Fahrstreifenmarkierungen überschreiten wird. Mit Annahme einer linearen Bewegungstrajektorie und stationärer Lateralbewegungen berechnet sich die TLC vereinfacht aus dem Quotienten des lateralen Abstands zu der entsprechenden Fahrstreifenmarkierung ( $y$ ) und der lateralen Annäherungsgeschwindigkeit ( $\dot{y}$ ):

$$TLC = \frac{y}{\dot{y}} \quad [s] \quad (3.2)$$

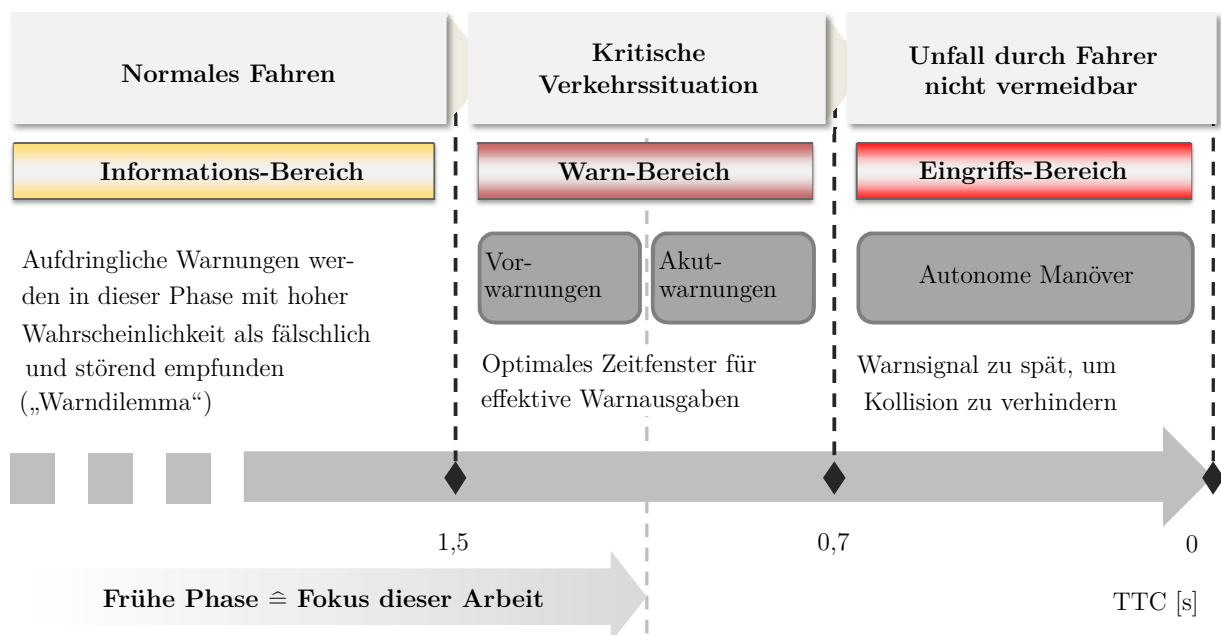
Weitere Berechnungsansätze werden in der Arbeit von Mammar et al. [108] beschrieben. Die TLC wird zum Beispiel als Auslösekriterium für die Lenkradvibration der Spurverlassenswarnung verwendet.

### 3.4.2 Eskalationsstrategien

Bei aktuellen Assistenzsystemen kann zwischen zwei Arten von Eskalationsstrategien, der situations- und fahrerinitiierten Eskalation, unterschieden werden:

**Situationsinitiierte Eskalation:**

Bei der situationsinitiierten Eskalation werden Warnstufen anhand der Kritikalität einer Verkehrssituation ausgelöst. Die Kritikalität einer Verkehrssituation wird durch Kenngrößen wie die TTC oder TLC bewertet. Rhede et al. [141] definieren hierfür fünf Kritikalitätsstufen, bestehend aus Information, Vorwarnung, Akutwarnung, Noteingriff und Deeskalation (siehe Abb. 3.2). Durch die Information soll die Aufmerksamkeit des Fahrers erhöht werden, um auf mögliche Gefahren in der Umgebung ausgerichtet zu werden. Bei der Vorwarnung soll der Fahrer bereits reagieren, hat aber mehrere Handlungsoptionen zur Auswahl und kann sich bewusst für eine entscheiden (z. B. Ausweichen oder Abbremsen). Dagegen muss der Fahrer bei der Akutwarnung reflexartig reagieren, da das verbleibende Zeitbudget nicht mehr zur Abwägung von Handlungsalternativen ausreicht. Beim Noteingriff übernimmt das Fahrzeug kurzzeitig die Fahraufgabe, und bei der Deeskalation wird dem Fahrer im Nachhinein der zuvor erfolgte Noteingriff erklärt. In jeder Kritikalitätsstufe können – je nach Dringlichkeit und verbleibendem Zeitbudget – verschiedene Modalitäten verwendet werden [101]. Rhede et al. [141] empfehlen optische Rückmeldungen besonders für frühe Assistenzausgaben, wie die Informations- oder Vorwarnstufe. Aufdringliche haptische und akustische Rückmeldungen sollten hier aufgrund einer geringeren Akzeptanz vermieden und eher für späte Phasen vorgesehen werden [157].



**Abbildung 3.2:** Situationsinitiierte Eskalationsstrategie anhand der TTC [115] [158]

Eine Herausforderung ist es, den optimalen Warnzeitpunkt zu finden. Denn eine zu frühe Warnausgabe wird mit hoher Wahrscheinlichkeit als unnötig oder als Falschwarnung empfunden [93] [158] [111], wogegen eine zu späte Ausgabe den Unfall möglicherweise nicht verhindert, da der Fahrer nicht mehr angemessen reagieren kann. Diese Problematik wird auch als Warn- und Eingriffsdilemma bezeichnet [106]. Spence und Ho [158] definieren drei Zeitbereiche für Assistenzausgaben. Das optimale Zeitfenster für Vor- und Akutwarnungen liegt zwischen einer TTC von 0,7 und 1,5 s. Zeitlich frühere Ausgaben beziehen sich auf den

Informationsbereich, bei dem die Problematik des Warndilemmas entstehen kann. Späte Ausgaben unterhalb einer TTC von 0,7 s müssen Eingriffe sein, da hier optische oder akustische Warnungen zu spät für eine angemessene Fahrerreaktion sind. Die in Kapitel 5 und 6 entwickelten Warn- und Informationskonzepte beziehen sich auf den Zeitbereich, in dem ein Übergang vom normalen Fahren in das Fahren in einer kritischen Verkehrssituation stattfindet, also den Informations- und Vorwarnbereich (siehe Abb. 3.2).

**Fahrerinitiierte Eskalation:**

Bei der fahrerinitiierten Eskalation werden Warnstufen anhand einer bestimmten Handlung des Fahrers ausgelöst. Zum Beispiel wird der Fahrer bei der Spurwechselwarnung durch die Anzeige im Außenspiegel über sich von hinten annähernde Fahrzeuge informiert. Erst das Setzen des Blinkers wird als Intention für einen Fahrstreifenwechsel gewertet, wodurch die Warnstufe ausgelöst wird (z. B. Lenkradvibration).

### 3.5 Schwächen der Mensch-Maschine-Schnittstelle bisheriger Fahrerassistenzsysteme

In den folgenden zwei Unterkapiteln werden – jeweils für die Längs- und Querführung – Schwächen bisheriger Assistenzkonzepte aufgezeigt, und daraus Anforderungen an neuartige Warn- und Informationskonzepte abgeleitet.

#### 3.5.1 Anforderungen an Warnkonzepte für die Längsführung

Die Warnstrategie aktueller Auffahrwarn-Systeme orientiert sich an potentiellen Gefahren im Fahrzeugumfeld und ist unabhängig vom Aufmerksamkeitszustand des Fahrers (siehe eindimensionale Warnstrategie in Abb. 3.3). Untersuchungen wie die „100 Car Study“ haben jedoch gezeigt, dass eine verminderte Aufmerksamkeit eine häufige Ursache für Unfälle oder Beinaheunfälle ist [118]. Darüber hinaus kann die Bewerkstelligung der Fahraufgabe durch das Bearbeiten von Nebenaufgaben beeinträchtigt werden (z. B. durch längere Reaktionszeiten, siehe Kap. 2.1.2). Blickt der Fahrer zum Beispiel während einer Navigationseingabe ins CID, so kann es passieren, dass rein optische Warnausgaben im Kombiinstrument oder HUD nicht wahrgenommen werden.

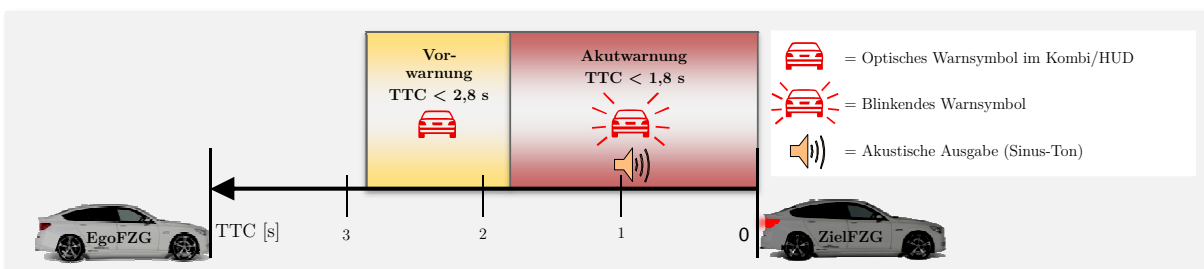


Abbildung 3.3: Eindimensionale Warnstrategie (Darstellung ohne Eingriffsbereich)

Daher bietet es sich an, zusätzlich den Aufmerksamkeitszustand – in diesem Fall die Blickrichtung – in die Warnstrategie mit einzubeziehen, damit der Fahrer schneller auf eine bevorstehende Gefahr hingewiesen werden kann [165] [3]. Mit einer solchen fahrerabhängigen Warnstrategie wird dem Fahrer je nach Blickrichtung eine „maßgeschneiderte“ Warnung präsentiert. So ergibt sich aus der bisherigen eindimensionalen Warnstrategie durch Hinzufügen der Dimension „Grad der Blickabwendung“ eine Warnmatrix.

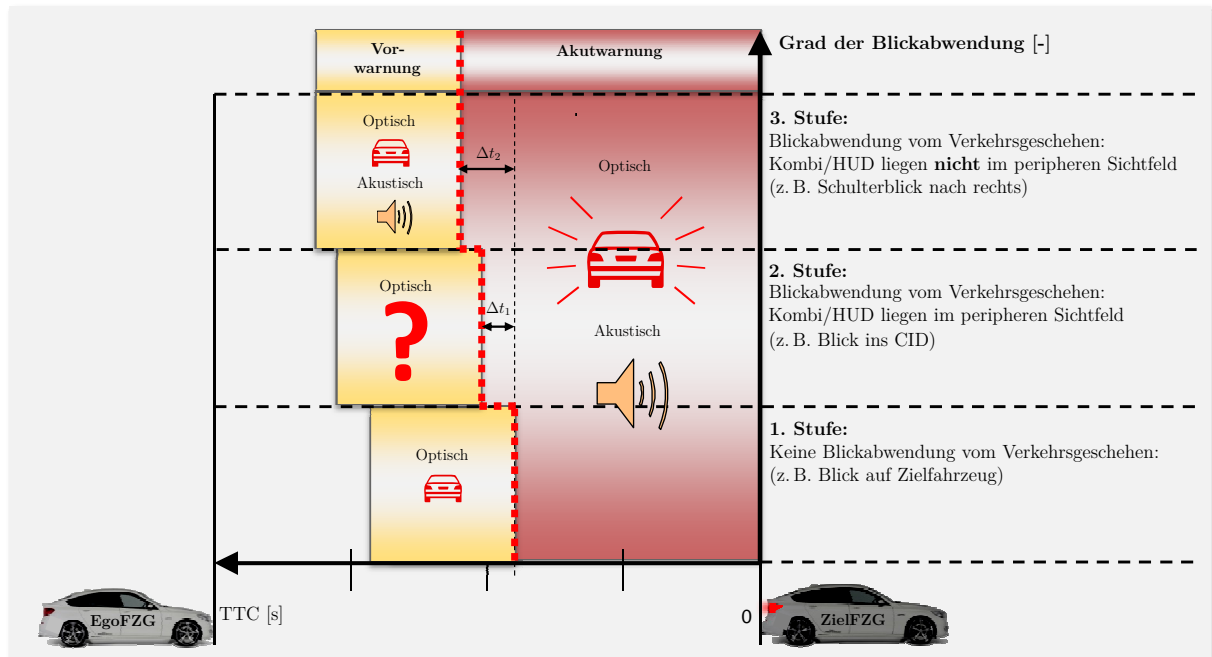


Abbildung 3.4: Zweidimensionale Warnstrategie (Warnmatrix)

Der Grad der Blickabwendung ist in der Warnmatrix in drei Stufen auf der Ordinate angegeben. In der ersten Stufe ist der Blick des Fahrers auf das Verkehrsgeschehen gerichtet, wodurch eine Anpassung der Warnstrategie nicht notwendig ist. In Stufe 2 ist der Aufmerksamkeitsfokus vom Verkehrsgeschehen so weit abgewendet, dass Anzeigen im Kombiinstrument und HUD noch peripher wahrgenommen werden können. Sind Anzeigeelemente im Kombiinstrument oder HUD nicht mehr wahrnehmbar (z. B. bei einem Schulterblick), wird Stufe 3 der Blickabwendung erreicht. Aus diesen drei Stufen und den zeitlich eskalierten Warnstufen lassen sich nun die Gestaltungsmöglichkeiten für fahrerabhängige Warnstrategien ableiten.

Im Falle einer Akutwarnung ist eine Kollisionsgefahr so hoch, dass ein aufdringlicher Warnerton zur Aufmerksamkeitslenkung unverzichtbar ist. Somit bleibt die Akutwarnung über alle Stufen der Blickabwendung von der Ausgabemodalität her gleich (optisch und akustisch). Lediglich die Warnzeitpunkte können mit zunehmender Blickabwendung vom Verkehrsgeschehen verändert werden [101] (dargestellt durch die Parameter  $t_1$  und  $t_2$ ). Die Vorwarnung hingegen besitzt aufgrund der geringeren Kritikalität einen eher informierenden als warnenden Charakter. Zu alarmierende Warntöne sind in dieser Phase der Unfallentstehung zu aufdringlich und somit zu vermeiden [100]. Als Ausnahme gilt die dritte Stufe der

Blickabwendung. In diesem Fall sollte bereits in der Vorwarnung akustisch gewarnt werden, da optische Ausgaben im Kombi und HUD nicht wahrgenommen werden können.

Da eine Blickabwendung ins CID ein häufig vorkommender Anwendungsfall ist (siehe Kap. 2.1.2), ist der zentrale Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit die Gestaltung der Vorwarnung in der zweiten Stufe der Blickabwendung (Fragezeichen in Abb. 3.4). In Bezug auf die anfangs in Kapitel 1.3 formulierten Ziele ergibt sich folgende Hauptfragestellung:

*Wie muss für den Fall einer Blickabwendung des Fahrers ins CID die Vorwarnung einer Auffahrwarnung angepasst werden, damit die Aufmerksamkeit vom Anzeigeort der Nebenaufgabe (CID) schnell und automatisch auf die Gefahr gerichtet wird?*

Demnach ergeben sich folgende Anforderungen an die Warnkonzepte:

- Erfassung des visuellen Aufmerksamkeitszustands durch eine geeignete Fahrerbeobachtung (hier Blickabwendungen ins CID, Behandlung in Kap. 4)
- Bewirkung einer schnell und automatisch ablaufenden Aufmerksamkeitssteuerung durch fertigkeitstbasiertes Verhalten. Aufgrund der empirischen Erkenntnisse aus Kapitel 3.3.2 sind hierfür die Hauptgestaltungsmerkmale „Richtungsspezifität“ und „Dynamik“ zu verwenden (Behandlung in Kap. 5)

### 3.5.2 Anforderungen an Informationskonzepte für die Querführung

Anders als bei Auffahrsituationen spielt bei einem Fahrstreifenwechsel das Thema Abwendung durch Nebenaufgaben keine entscheidende Rolle. Der Fahrer leitet ein von sich aus motiviertes Fahrmanöver ein und bricht mit hoher Wahrscheinlichkeit Nebenaufgaben ab oder reduziert zumindest das Aktivitätsniveau bezüglich der Nebenaufgabe (z. B. längere Pausen beim Sprechen während eines Telefonats). Hierdurch kann der Fahrer seine Aufmerksamkeit verstärkt der primären Fahraufgabe widmen [127] [128].

Eine Schwäche der bisherigen Warnstrategie der Spurwechselwarnung ist die fahrerinitiierte Eskalationsstrategie z. B. durch Setzen des Blinkers. Die Spurwechselwarnung warnt den Fahrer erst, sobald die Absicht eines Fahrstreifenwechsels erkannt wird. Hoch [69] und Mann [109] haben hierfür verschiedene Fahrerhaltensmodelle vorgestellt, die anhand von Fahrdaten ein absichtliches oder unabsichtliches Verlassen des Fahrstreifens vorherzusagen. Jedoch verspricht keiner dieser Ansätze eine vergleichbare Zuverlässigkeit wie die Verwendung des Blinkersignals zur Auslösung der Warnstufe. In einer Studie des ADAC wurde jedoch herausgefunden, dass 45 % der beobachteten Fahrer beim Fahrstreifenwechsel auf einer innerstädtischen Straße und 35 % auf der Autobahn nicht blinken [159]. Diese Fahrer würden im Falle eines kritischen Fahrstreifenwechsels – d. h. bei dem sich ein Fahrzeug im toten Winkel befindet – keine Warnstufe, sondern nur die Informationsstufe der Spurwechselwarnung erhalten. Die Wahrscheinlichkeit, dass dieser unaufdringliche optische Hinweis hierbei übersehen wird, ist relativ hoch [109]. In Bezug auf die anfangs in Kapitel 1.3 formulierten Ziele ergibt sich folgende Hauptfragestellung:



*Wie muss die Informationsstufe einer Spurwechselwarnung gestaltet werden, damit sie jederzeit wahrnehmbar ist, der Fahrer ein verbessertes räumliches Situationsbewusstsein erhält, dabei jedoch nicht gestört oder abgelenkt wird?*

Demnach ergeben sich folgende Anforderungen an die Informationskonzepte:

- Verbesserung des Situationsbewusstseins durch dezente, aber wahrnehmbare Hinweisreize. Hierbei sind die Hauptgestaltungsmerkmale Richtungsspezifität und Dynamik zu verwenden
- Keine Störung oder Ablenkung durch die Information bei ausbleibender Absicht eines Fahrstreifenwechsels

Der hier zu betrachtende Anwendungsfall ist eine Verkehrssituation, bei der der Fahrer die Absicht hat den Fahrstreifen zu wechseln, während sich ein Fahrzeug im toten Winkel befindet (Behandlung in Kap. 6).

## 3.6 Zusammenfassung

Das Spektrum der Fahrerassistenz umfasst Sicherheits- und Komfortsysteme. Beide Gruppen lassen sich nach dem Grad der Unterstützung und der Ebene der Fahraufgabe, auf der sie wirken, systematisieren. Sicherheits-FAS bewahren oder unterstützen den Fahrer durch Informationen, Warnungen oder Eingriffe vor bzw. in kritischen Verkehrssituationen. Assistenzausgaben können nach den vier Hauptgestaltungsmerkmalen Reizintensität, Konflikt-, Richtungsspezifität und Dynamik ausgelegt werden. Empirische Befunde lassen darauf schließen, dass richtungsspezifische und dynamische Assistenzausgaben einen positiven Effekt auf die Fahrerreaktion haben, weshalb sie eine zentrale Rolle bei der Gestaltung der Warn- und Informationskonzepte dieser Arbeit einnehmen. Einzelne Assistenzausgaben sind bei den meisten Fahrerassistenzsystemen in eine Warn- und Informationsstrategie integriert. Hierbei kann zwischen einer situations- und fahrerinitiierten Eskalationsstrategie unterschieden werden. Bei beiden wird mit Zunahme der Kritikalität einer Verkehrssituation die Dringlichkeit einer Warnmeldung erhöht. Demnach werden dezente Rückmeldungen in der frühen, aufdringliche dagegen in der späten Phase einer kritischen Verkehrssituation eingesetzt. Hierdurch können Assistenzausgaben in der frühen Phase leicht übersehen werden, was als Schwachpunkt der MMS aktueller Fahrerassistenzsysteme betrachtet wird. Zum Beispiel wird der Aufmerksamkeitszustand bei Assistenzsystemen der Längsführung nicht berücksichtigt, wodurch bei visueller Abwendung unaufdringliche Informationen oder Vorwarnungen unbemerkt bleiben können [101]. Ein Schwachpunkt von Assistenzsystemen der Querführung ist dagegen die fahrerinitiierte Eskalationsstrategie. Ein Fahrstreifenwechsel ohne Blinkerbetätigung – was nach [159] häufig vorkommt – führt demnach zu keiner Warnung. Somit stellen die in dieser Arbeit entwickelten Warn- und Informationskonzepte Lösungsansätze für die aufgeführten Schwächen dar. Bereits in der frühen Phase einer kritischen Verkehrssituation soll ein mögliches Aufmerksamkeitsdefizit erkannt werden und dementsprechend eine schnelle Ausrichtung der Aufmerksamkeit auf die Gefahr erfolgen (Informations- und Vorwarnbereich, siehe Abb. 3.2).



---

### Neuartige Verfahren zur Erfassung des Fahrerzustands

---

In diesem Kapitel werden neuartige Verfahren vorgestellt, mit denen der Aufmerksamkeitszustand des Fahrers in Echtzeit geschätzt werden kann, um hierdurch Warnausgaben von Assistenzsystemen anzupassen. Grundsätzlich kann der Aufmerksamkeitszustand durch vier kurzfristige Abwendungsarten beeinträchtigt werden [164]:

- visuell (z. B. Blickabwendung ins CID)
- auditiv (z. B. einem akustischen Navigationshinweis zuhören)
- motorisch (z. B. Drücken eines Knopfes in der Mittelkonsole)
- kognitiv (z. B. mit der Freisprechanlage telefonieren)

Diese Abwendungsarten können entweder durch direkte oder indirekte Verfahren gemessen werden [63]:

#### **Direkte Messung:**

Bei der direkten Messung werden die relevanten Parameter direkt am Fahrer über entsprechende Sensoren erfasst. Mit einer Kamera, die den Kopf- und Schulterbereich des Fahrers aufnimmt, können zum Beispiel die Kopfpose und Blickrichtung und somit visuelle Abwendungen gemessen werden. Kognitive Abwendung kann beispielsweise über die Messung der elektrischen Aktivität des Gehirns oder dessen Hautleitwiderstand erfasst werden (z. B. durch das EEG = Elektroenzephalographie bzw. SCR = skin conductance response) [156] [14].

### **Indirekte Messung:**

Bei der indirekten Messung werden die relevanten Parameter nicht direkt am Fahrer, sondern indirekt über fahrzeugeigene Sensoren geschätzt (z. B. Fahrdynamik-Sensoren oder Bedienelemente). Die Messung der kognitiven Abwendung über die Art und Dauer von Nebenaufgaben gehört beispielsweise zu diesem Verfahren [63] [101].

Ein Vorteil der indirekten Verfahren ist, dass die Messung ohne zusätzliche Sensorik erfolgt und somit keine Hardware- und Integrationskosten bei der Serienentwicklung entstehen. Die in der Literatur beschriebenen indirekten Verfahren haben jedoch gemein, dass ihr Ergebnis z. B. ein gestufter oder kontinuierlicher Aufmerksamkeitsgrad ist (wenig-mittel-hoch bzw. 0 % bis 100 %) [3] [63] [94]. Hierbei werden die von Tijerina [164] definierten Abwendungsarten nicht immer getrennt voneinander betrachtet. Zum Beispiel wurde im Förderprojekt HAVEit ein Fahrerzustandsmodell entwickelt, das anhand der Art der Nebenaufgaben und der Dauer der Bedienpausen einen kategorialen Aufmerksamkeitsgrad schätzt. Für die Anpassung optischer Warnausgaben ist es jedoch erforderlich, genau zu wissen, ob der Fahrer auf das Fahrgeschehen blickt oder visuell abgewendet ist (siehe Warnmatrix in Abb. 3.4).

Daher messen die in dieser Arbeit vorgestellten Verfahren indirekt den visuellen Aufmerksamkeitszustand des Fahrers anhand der primären und tertiären Fahrer-Fahrzeuginteraktion. In diesem Kapitel werden neuartige Verfahren konzeptioniert, umgesetzt und auf ihre Genauigkeit evaluiert. In Bezug auf die in Kapitel 3.5.1 definierten Anforderungen an die Warnkonzepte für die Längsführung ist hier das Ziel, ein Fahrerzustandsmodell zu entwickeln, das

- indirekt und in Echtzeit Blickabwendungen ins CID schätzt
- auf einfachen und nachvollziehbaren Regeln oder Zusammenhängen basiert

## **4.1 Grundlagen der Modellentwicklung**

Die Entwicklung und Bewertung der hier vorgestellten Verfahren wird anhand von Fahrsimulatorendaten vorgenommen. Nach folgendem Entwicklungsprozess wird hierbei vorgegangen:

1. Datensatzgenerierung im Fahrsimulator (Kap. 4.2.1)
2. Datensatzanalyse (Kap. 4.2.2)
3. Modellentwicklung (Kap. 4.2.4 & 4.2.5)
4. Validierung und Evaluation der Modelle (Kap. 4.2.6)

Im folgenden Unterkapitel werden Grundlagen von Klassifikationsverfahren vorgestellt und die für diese Arbeit relevanten Verfahren ausgewählt. Eine ausführliche Beschreibung der Verfahren ist in der entsprechenden Fachliteratur zu finden (z. B. [5] [11]).

### 4.1.1 Klassifikationsverfahren

Ein Klassifikator ordnet Objekte anhand bestimmter Kriterien (Attribute) verschiedenen Kategorien (Klassen) zu. Die beiden Klassen dieser Arbeit heißen „CID\_Blick = true“ (der Fahrer blickt ins CID) und „CID\_Blick = false“ (der Fahrer blickt nicht ins CID). Bei der Konzeptionierung eines Klassifikators geht es um eine Art Wissensgenerierung, d. h. , in einer Menge von Daten Regel-, Gesetzmäßigkeiten oder Muster zu erkennen, welche die Realität annähernd genau beschreiben. Klassifikatoren können durch eine a-priori oder heuristische Modellierung generiert werden [69]:

#### 1. A-priori Modellierung:

Bei der a-priori Modellierung werden Zusammenhänge alleine aus Vorwissen oder Beobachtungen des Menschen generiert. Sie werden somit ohne Verwendung von Mustererkennungsalgorithmen erstellt (siehe 2. Heuristische Modellierung). Zur Schätzung von Blickabwendungen ins CID werden einfache „Wenn ... dann - Beziehungen“ aus bestehenden Daten abgeleitet. Wenn die Fahrer zum Beispiel den Dreh-Drück-Steller betätigen, dann blicken sie ins CID. Diese Modellierung hat den Vorteil, dass ein solcher Klassifikator eine geringe Komplexität aufweist und dadurch die Entscheidung für eine Klasse stets nachvollziehbar ist. Ein Nachteil ist jedoch, dass sich möglicherweise die Komplexität der Aufmerksamkeitssteuerung nicht durch eine einfache Regel ausreichend genau abbilden lässt und weitere wichtige Zusammenhänge unberücksichtigt bleiben. Wenn zum Beispiel Fahrer die Nebenaufgabe bedienen, während sie zur Straße blicken, dann liefert eine solche Entscheidungsregel ein falsches Klassifikationsergebnis.

#### 2. Heuristische Modellierung:

Bei der heuristischen Modellierung werden Klassifikatoren mit Hilfe von komplexen, numerischen Algorithmen des maschinellen Lernens erzeugt. Aus bestehenden Messungen (Instanzen), in denen bestimmte Attribute und die zugehörige Kategorie (Klasse) bekannt sind, können wiederkehrende Muster sowie Zusammenhänge zwischen den Attributen und Klassen abstrahiert werden. Man spricht hier auch von einem Lernen oder Trainieren der Modelle auf Basis von Trainingsdaten, dem sogenannten überwachten Lernen. Häufig verwendete Verfahren sind Neuronale Netze (NN), Hidden-Markov-Modelle (HMM), Support Vektor Maschinen (SVM), CART oder C5.0 Algorithmen zur Generierung von Entscheidungsbäumen (EB) sowie Regressionsmodelle (RM). In dieser Arbeit werden der C5.0-Algorithmus für Entscheidungsbäume sowie ein Regressionsmodell verwendet. Die übrigen Verfahren werden aufgrund der zu Beginn des Kapitels definierten Anforderungen nicht in Betracht gezogen, da sie teilweise sehr komplexe Modelle erzeugen, die aus Zwischenknoten bzw. -vektoren mit entsprechenden Gewichtungsfaktoren bestehen (z. B. NN oder SVM). Solche Zwischenknoten lassen keine greifbaren Regeln oder Zusammenhänge erkennen, weshalb diese Modelle keine nachvollziehbare Entscheidungstransparenz bieten. Ein Nachteil der heuristischen Modellierung ist das Risiko der Überanpassung (englisch: Overfitting). Hierbei werden die Trainingsdaten quasi „auswendig“ gelernt, wodurch die Klassifikationsgüte bei unbekanntem Daten stark abnehmen kann. Eine Verallgemeinerung der Ergebnisse ist in diesem Fall nicht mehr möglich. Mittels Kreuzvalidierung (englisch: Cross-validation) kann das Risiko einer Überanpassung reduziert werden (siehe Kap. 4.2.5).

### 4.1.2 Bewertung von Klassifikatoren

Sämtliche Ergebniskombinationen eines Klassifikators können der Vierfeldertafel aus der Signalentdeckungstheorie entnommen werden (siehe Tab. 4.1). Die beiden Spalten geben den wahren Sachverhalt an, also ob der Fahrer ins CID blickt; die beiden Zeilen stellen die zwei möglichen Ergebniszustände des Klassifikators dar. Die Häufigkeit der verschiedenen Ergebniskombinationen innerhalb einer bestimmten Anzahl von Instanzen liefert bestimmte Beurteilungsmetriken, die wie folgt berechnet werden [69]:

**Korrektklassifikationsrate:** Relative Häufigkeit für eine richtige Entscheidung des Klassifikators.

$$p(\text{Richtig}) = \frac{\text{hit} + \text{correct\_rejection}}{\text{hit} + \text{correct\_rejection} + \text{false\_alarm} + \text{miss}} \quad (4.1)$$

**Falschklassifikationsrate:** Relative Häufigkeit für eine falsche Entscheidung des Klassifikators.

$$p(\text{Falsch}) = \frac{\text{false\_alarm} + \text{miss}}{\text{hit} + \text{correct\_rejection} + \text{false\_alarm} + \text{miss}} \quad (4.2)$$

**Richtig-Positiv-Rate** oder Sensitivität: Relative Häufigkeit, dass eine Blickabwendung ins CID vom Klassifikator erkannt wird.

$$p(\text{Richtiger CID-Blick}) = \frac{\text{hit}}{\text{hit} + \text{false\_alarm}} \quad (4.3)$$

**Richtig-Negativ-Rate** oder Spezifität: Relative Häufigkeit, dass kein Blick ins CID vom Klassifikator erkannt wird. In diesem Fall bedeutet dies einen Blick zur Straße.

$$p(\text{Richtiger Straßen-Blick}) = \frac{\text{correct\_rejection}}{\text{correct\_rejection} + \text{false\_alarm}} \quad (4.4)$$

**Falsch-Positiv-Rate** ( $\alpha$ -Fehler oder Fehler 1. Art): Relative Häufigkeit, dass – obwohl der Fahrer zur Straße blickt – ein Blick ins CID erkannt wird.

$$p(\text{Falscher CID-Blick}) = \frac{\text{false\_alarm}}{\text{correct\_rejection} + \text{false\_alarm}} \quad (4.5)$$

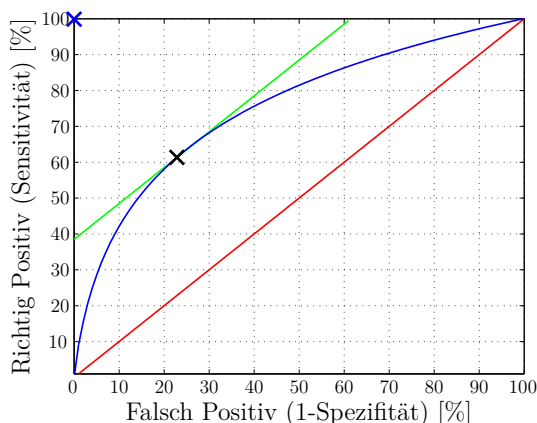
**Falsch-Negativ-Rate** ( $\beta$ -Fehler oder Fehler 2. Art): Relative Häufigkeit, dass – obwohl der Fahrer ins CID blickt – ein Blick zur Straße erkannt wird.

$$p(\text{Falscher Straßen-Blick}) = \frac{\text{miss}}{\text{hit} + \text{miss}} \quad (4.6)$$

Um die Klassifikationsgüte der verschiedenen Fahrerzustandsmodelle miteinander vergleichen zu können, ist die Definition einer Hauptbewertungsmetrik erforderlich. Da eine ungleichmäßige Verteilung der beiden Klassen  $CID\_Blick = true$  und  $CID\_Blick = false$  möglich ist (keine 50:50 Verteilung der Blicke ins CID und zur Straße), ist die Verwendung der oben beschriebenen Korrektklassifikationsrate ungeeignet. Ein Klassifikator, der rein zufällig seine Entscheidungen trifft, wird bei einer schiefen Verteilung der Klassen eine Korrektklassifikationsrate von mehr als 50 % liefern ( $p(\text{Richtig}) > 0,5$ ). Hoch [69] schlägt hierfür die Verwendung des gewichteten, arithmetischen Mittels aus Sensitivität und Spezifität, den sogenannten mean recall  $MR_\mu$ , vor. In den folgenden Kapiteln werden die Spezifität und Sensitivität gleich gewichtet, weshalb  $\mu = 1$  gilt [69].

$$MR_\mu = \frac{(\mu \cdot \text{Spezifität}) + \text{Sensitivität}}{1 + \mu} \quad (4.7)$$

Zur grafischen Darstellung der Klassifikationsgüte wird in der Signalentdeckungstheorie die Receiver-Operating-Characteristic (ROC-Kurve) verwendet (siehe Abb. 4.1). In dieser wird die Richtig-Positiv-Rate (Sensitivität) auf der Ordinate und die Falsch-Positiv-Rate (1-Spezifität) auf der Abszisse als Wertepaar angegeben. ROC-Kurven eignen sich vor allem zur Parameteroptimierung von Klassifikatoren. Ein Klassifikationsergebnis nahe der roten Diagonalen deutet auf einen Zufallsprozess hin (gleiche Richtig-Positivrate und Falsch-Positivrate). Eine optimale ROC-Kurve steigt parabelförmig an und reicht so nah wie möglich an das entscheidungstheoretische Optimum ( $x = 0, y = 100$ , blaues Kreuz). Somit ist der optimale Parametrisierungswert der Kontaktpunkt (schwarzes Kreuz) einer 45° ansteigenden Tangente (grüne Linie) mit der ROC-Kurve (größte Entfernung von roter Diagonalen, und somit von einem Zufallsprozess).



**Abbildung 4.1:** Beispiel einer Receiver-Operating-Characteristic (ROC-Kurve) [69]

	Fahrer blickt ins CID	
	ja	nein
Blick ins CID wird erkannt	Richtig positiv Sensitivität (hit)	Falsch Positiv Fehler 1. Art (false alarm)
Blick ins CID wird nicht erkannt	Falsch negativ Fehler 2. Art (miss)	Richtig negativ Spezifität (correct rejection)

**Tabelle 4.1:** Vierfeldertafel zur Bewertung des Klassifikators

## 4.2 Entwicklung eines Fahrerzustandsmodells

Zur Messung der Aufmerksamkeitsverteilung zwischen der Fahr- und Nebenaufgabe bestehen in der Literatur Kenngrößen wie die Anzahl der Blickabwendungen [n], Summe aller Blickabwendungsdauern [s], mittlere Blickabwendungsdauer [s] und der Parameter „Percent Road Center“ (PRC) [%]. Dieser beschreibt das Verhältnis der Fixationsdauern zwischen der Area of Interest (AOI) der Nebenaufgabe – hier dem CID – und der Straße [169]:

$$PRC = \frac{\text{Summe aller Blickabwendungsdauern [s]}}{\text{Gesamtdauer der Nebenaufgabe [s]}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4.8)$$

Diese Kenngrößen hängen von der Handlung, der hieraus resultierenden Erwartung sowie dem Situationsbewusstsein des Fahrers ab (siehe z. B. SEEV-Modell von Horrey et al. [72]). Bei der Entwicklung des Fahrermodells sind daher folgende externe Faktoren, die einen Einfluss auf die Erwartung, das Situationsbewusstsein und somit auf das Blickverhalten haben, zu berücksichtigen [112]:

1. **Straßentyp:** Zum Beispiel ist die mittlere Blickabwendungsdauer auf Landstraßen niedriger als auf der Autobahn [176]
2. **Straßenverlauf:** Tsimhoni und Green [166] zeigten, dass die mittlere Blickabwendungsdauer auf kurvigen Straßen niedriger ist als auf geraden Straßen
3. **Verkehrssituation:** Die Verkehrsdichte oder auch der Abstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeug haben einen Einfluss auf das Blickverhalten [134]
4. **Sichtbedingungen:** Zum Beispiel verändert sich das Blickverhalten bei Nebel oder starkem Regen gegenüber einer Fahrt mit optimalen Sichtbedingungen [152]

### 4.2.1 Datensatzgenerierung

In einer Probandenstudie im statischen Fahrsimulator der BMW Forschung und Technik GmbH werden die Daten zur Modellgenerierung und -bewertung aufgezeichnet. Die Simulationsumgebung des Fahrsimulators basiert auf dem Betriebssystem Linux und besteht aus einem Verbund mehrerer Rechner, die über ein schnelles Backbone-Netzwerk miteinander kommunizieren. Dabei sind einzelne Berechnungsmodule wie z. B. Eigenfahrtdynamik, Fremdfahrzeuge, Graphikkanäle usw. auf einzelne Rechner verteilt. Die Darstellung der virtuellen Umgebung übernehmen drei Projektoren, die das Bild auf eine Rundleinwand mit einem Öffnungswinkel von 220° projizieren. Die Sicht nach hinten wird über drei Plasmadisplays, die sich hinter der Sitzkiste – einem bis zur B-Säule nachgebildeten Fahrzeug – befinden (siehe Abb. 4.2). Alle Bedienelemente, wie z. B. das Lenkrad, das Gas- und Bremspedal, kommunizieren über einen CAN-Bus (Controller Area Network) mit der Simulationsumgebung. Die Kombiinstrument-, CID- und HUD-Inhalte werden über eine sogenannte Floris-Simulation dargestellt (die Simulation läuft auf extra MMI-PCs). Floris



ist ein von BMW entwickeltes Framework, das als Anzeige-Engine Adobe Flash verwendet. Hierdurch können Anzeigen über Netzwerk von der Fahrsimulation angesteuert werden (z. B. Geschwindigkeitsanzeige [163]). Da die Funktionsmodelle vieler Fahrerassistenzsysteme in der Software Simulink (MATLAB-Toolbox) der Firma MathWorks umgesetzt sind, gibt es die Möglichkeit, eine Simulink-Simulation über Netzwerk an die Fahrsimulation zu koppeln. Über diese sogenannte Co-Simulation können Daten von der Fahrsimulation empfangen, verarbeitet und wieder zurückgesendet werden (z. B. für die Abstandsregelung des ACCs).

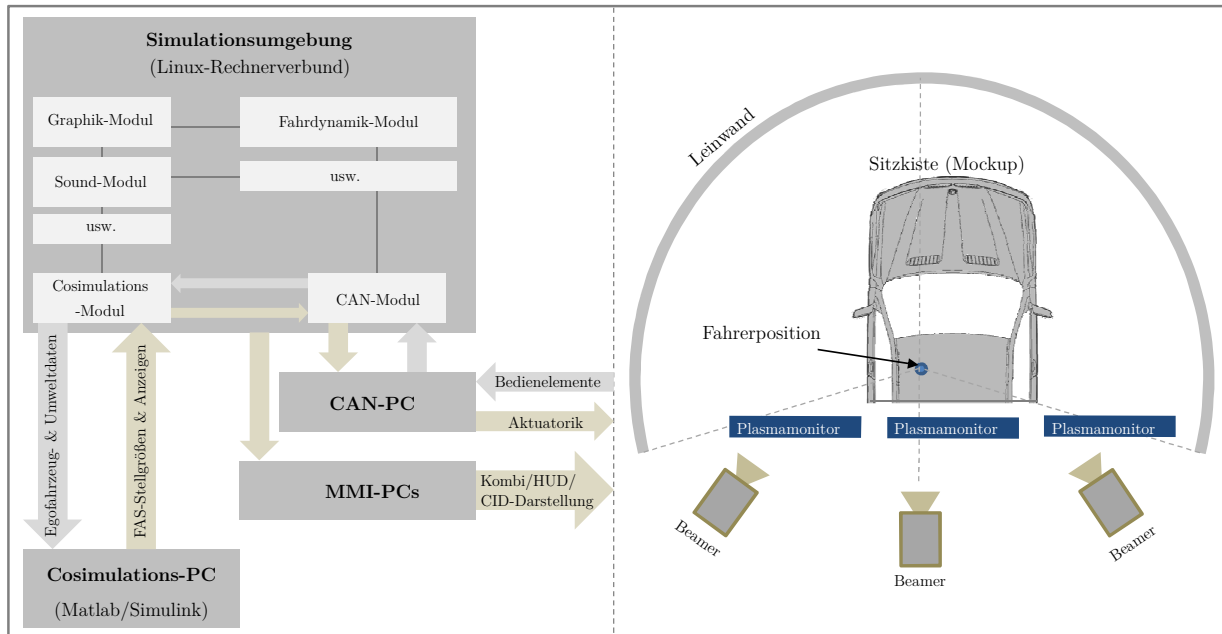


Abbildung 4.2: Hardware- und Softwarearchitektur des Fahrsimulators

Alle Fahrdaten werden mit einer Frequenz von 100 Hz über die gesamte Dauer einer Fahrt erfasst. Die Blickdaten werden mit dem Head-mounted Eyetracker Dikablis der Firma Ergoneers [42] mit 25 FPS (frames per seconds) aufgezeichnet. Die Anfangs- und Endzeitpunkte, in denen die Fahrer in das AOI „CID“ blicken (siehe Abb. 4.3), werden mit der Auswertesoftware D-Lab der Firma Ergoneers mittels automatischer Blickzuwendungserkennung bestimmt. Mit Hilfe eines mit der Software MATLAB entwickelten Algorithmus wird die Variable „Referenzblick“ entsprechend der Blickzeitpunkte mit dem Wert *true* oder *false* den Fahrdaten hinzugefügt ( $true \hat{=} \text{Blick ins AOI CID}$ ,  $false \hat{=} \text{kein Blick ins AOI CID}$ ). Dabei sind die Blickzeitpunkte auf den 100 Hz Zeitstempel der Fahrdaten angepasst. Die zeitliche Synchronisation der Blick- und Fahrdaten erfolgt anhand eines Markierungsevents, das in beiden Datensätzen für einen Rechenschritt auf „1“ gesetzt ist. In Tabelle 4.2 sind alle aufgezeichneten Parameter und deren Wertebereiche dargestellt.

### Stichprobe:

Die in der Fahrstudie betrachtete Stichprobe besteht aus  $N = 30$  Fahrern mit einem Altersdurchschnitt von 34,7 Jahren ( $SD = 9,7$  Jahre). Hierunter sind sieben Frauen und 23 Männer. Neun Teilnehmer haben keine iDrive Erfahrung. Zehn Fahrer haben eine

	Aufgezeichnete Parameter	M	SD	Min	Max	Einheit bzw. Zustände
Primär	Lenkwinkel $\delta$	-2,50	2,56	-25,94	9,20	[°]
	Lenkwinkelgeschwindigkeit $d\delta/dt$	0,00	4,23	-74,25	60,23	[°/s]
	Gaspedalstellung $\gamma$	5,00	9,00	0,00	100	[%]
	Bremsdruck $p_{Brems}$	0,00	0,80	0,00	12,00	[%]
Tertiär	Dreh-Drück-Steller (iDrive-Controller)	-	-	0	3	0 = keine Eingabe 1 = Drehen 2 = Drücken 3 = Kippen
Sonstige	Geschwindigkeit $v$	39,68	2,05	31,92	47,51	[Km/h]
	Referenzblick	-	-	0	1	0 = Straßen-Blick 1 = CID-Blick

**Tabelle 4.2:** Deskriptive Statistik der aufgezeichneten Parameter. Mittelwert (M), Standardabweichung (SD), kleinster (MIN) und größter (MAX) vorkommender Wert in der Prüfsituation

jährliche Fahrleistung von weniger als 10.000 km, 15 Fahrer geben an, zwischen 10.000 und 20.000 km pro Jahr zu fahren und fünf mehr als 20.000 km.

### Prüfsituation:

Die Prüfsituation ist so gestaltet, dass die vier externen Einflussfaktoren (1. Straßentyp, 2. Straßenverlauf usw.) bei jedem Fahrer gleich sind und somit keinen Einfluss auf die Aufmerksamkeitssteuerung haben. So folgen die Probanden einem vorausfahrenden Fahrzeug auf einer geraden Autobahn auf dem mittleren Fahrstreifen. Das Vorderfahrzeug und die Fahrzeugkolonne auf dem rechten und linken Fahrstreifen fahren konstant 45 km/h. Die Fahrer können hierbei selbst ihren gewünschten Abstand zum Vorderfahrzeug wählen. Es gibt keine Sichtbeeinträchtigungen aufgrund von Dunkelheit oder schlechten Witterungsbedingungen. Als Nebenaufgabe dient eine iDrive-Eingabe im Navigationssystem der aktuellen 7er Serie von BMW. In der Prüfsituation sollen die Fahrer in dem sogenannten Spellermenü (siehe Abb. 4.3) durch Betätigung des Dreh-Drück-Stellers buchstabenweise die Stadt „Dresden“ ins Navigationsmenü eingeben. Die Prüfsituation beginnt – also der Zeitpunkt für die Datenauswertung – sobald das Spellermenü im CID erscheint und endet, sobald die Fahrer den letzten Buchstaben „n“ eingeben. Vor der Prüfsituation machen sich die Fahrer in einer Einführungsfahrt mit der Fahrzeugführung im statischen Fahrsimulator und der Bedienung der Nebenaufgabe vertraut.

### Gesamt-Datensatz:

Die 30 Prüfsituationen aller Probanden können in einem Gesamt-Datensatz zusammengefasst werden, indem – wie in Abbildung 4.3 unten dargestellt – die Messdaten jedes Probanden nacheinander in eine Datenmatrix eingetragen werden. Jede Zeile stellt einen Messzeitpunkt (Zykluszeit: 10 ms) dar und entspricht einer Instanz. Neben dem Zeitstempel und der Probandennummer sind alle Fahr- und Bediendaten als Attribute und die zugehörige Klasse „Referenzblick“ spaltenweise eingetragen. Diese Datenmatrix besteht



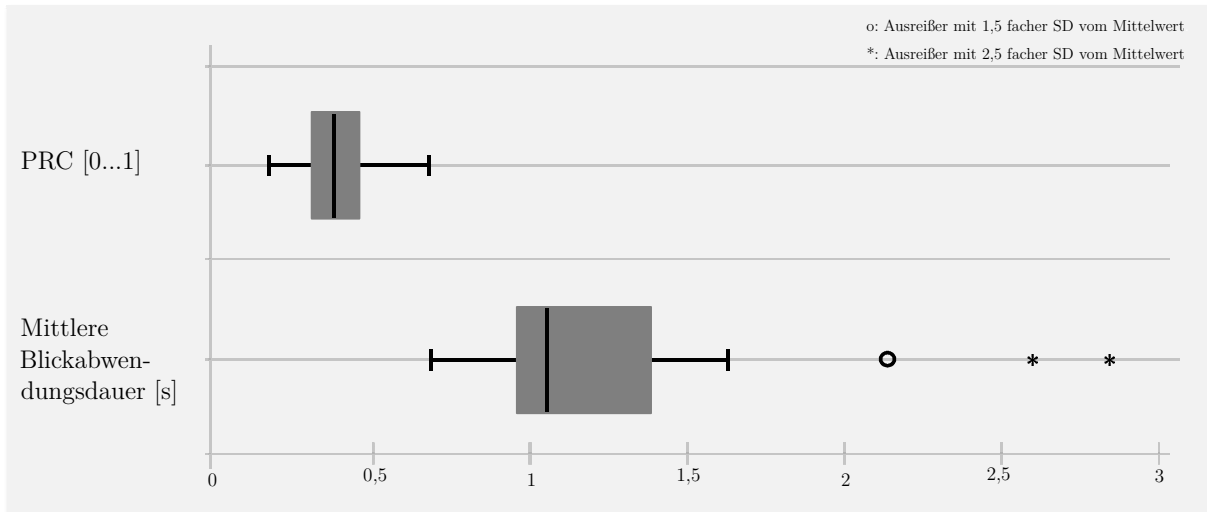
**Abbildung 4.3:** Streckendesign der Prüfsituation, Dikablis Onlinebild mit Blickfadenkreuz und Spellermenü zur Navigationseingabe (oben), zeitsynchrone Datenaufzeichnung der Fahr- und Blickdaten (mitte) und Zusammenführen aller Probanden in einen Datensatz (unten)

aus 57.478 Instanzen und enthält alle für die Modellgenerierung benötigten Eingangs- und Ausgangsgrößen.

## 4.2.2 Datensatzanalyse

Um das Risiko einer Überanpassung zu mindern, wird der gesamte Datensatz in einen Trainings- und Testdatensatz aufgeteilt. Die Klassifikatoren werden ausschließlich auf Basis des Trainingsdatensatzes entwickelt und mit dem – für die generierten Modelle – unbekanntem Testdatensatz hinsichtlich ihrer Klassifikationsgüte bewertet. Die Aufteilung der Probanden in die beiden Datensätze erfolgt so, dass in beiden Stichproben ungefähr die gleiche Anzahl verschiedener Bedientypen vorliegt, ansonsten aber zufällig. Denn manche Fahrer blicken überwiegend auf die Straße während der Nebenaufgabe und führen die Bedieneingabe beinahe „blind“ durch. Andere blicken dagegen überwiegend ins CID und machen nur kurze Kontrollblicke zur Straße. Daher werden alle Fahrer hinsichtlich der

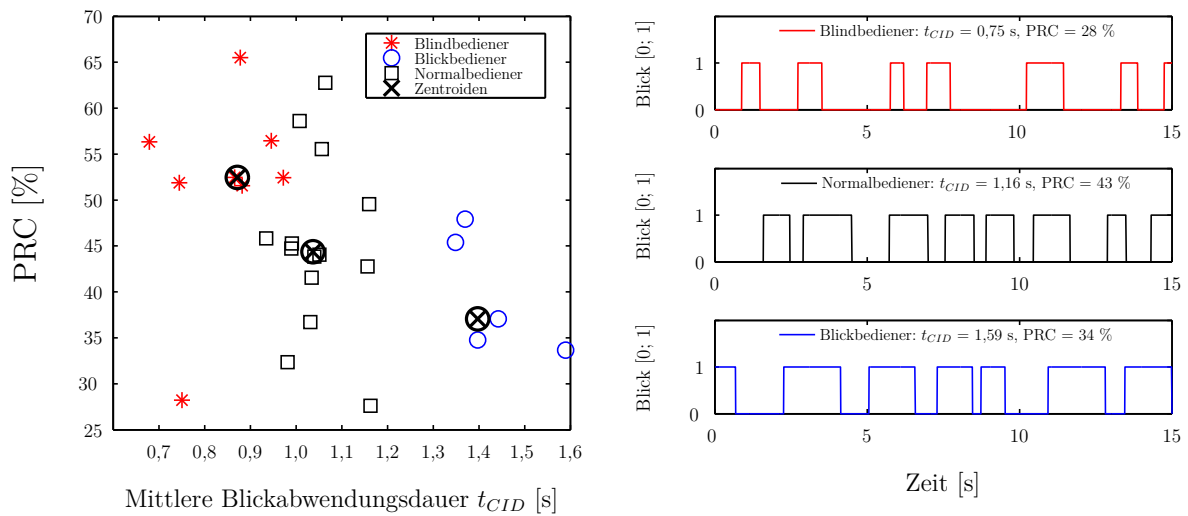
Kenngößen mittlere Blickabwendungsdauer und PRC entsprechenden Bedientypen zugeordnet. Mit Hilfe dieser beiden Kenngrößen lässt sich das Blickverhalten eines Fahrers ausreichend genau charakterisieren (1. wie lange blickt ein Fahrer im Schnitt ins CID und 2. in welchem Verhältnis zur gesamten Bedienzeit) [103]. Drei Ausreißer der Kenngröße mittlere Blickabwendungsdauer werden hier nicht weiter betrachtet (siehe Abb. 4.4).



**Abbildung 4.4:** Boxplots der mittleren Blickabwendungsdauer und der PRC (der Prozentwert ist zur Anschaulichkeit in einen Wertebereich von 0 bis 1 umgerechnet)

Mittels k-Means-Clustermethode können die Fahrer anhand der beiden Kenngrößen drei möglichen Bedientypen zugeordnet werden. Diese sind der „Blickbediener“, dessen visueller Aufmerksamkeitsfokus verstärkt auf der Nebenaufgabe liegt, der „Blindbediener“, der überwiegend auf die Straße blickt und der „Normalbediener“, dessen Aufmerksamkeitsverteilung zwischen Nebenaufgabe und Straße ungefähr gleich ist. In Abbildung 4.5 (links) ist die Einteilung aller Fahrer in die entsprechenden Cluster dargestellt. Anhand der mittleren Blickabwendungsdauer unterscheiden sich die Fahrer deutlich voneinander (Blindbediener < ca. 0,95 s, Normalbediener ca. 0,95 bis 1,2 s und Blickbediener > ca. 1,2 s). Der RPC-Wert ist jedoch kein differenzierendes Merkmal, da jedes Cluster den gesamten Wertebereich aller vorkommender PRC-Werte enthält (zwischen 25 und 65 %, mit Ausnahme des Blindbedieners).

Demnach können dreizehn Probanden (vier Blind-, sieben Normal- und zwei Blickbediener) dem Trainingsdatensatz zugeteilt werden. Die mittlere Blickabwendungsdauer dieser Fahrer beträgt im Schnitt 1,03 Sekunden, die PRC liegt im Schnitt bei 45 %. 14 Fahrer zählen zum Testdatensatz (vier Blind-, sieben Normal- und drei Blickbediener), dessen mittlere Blickabwendungsdauer im Schnitt bei 1,09 Sekunden und die PRC bei 47 % liegt. Der Trainingsdatensatz besteht aus 27.344 Instanzen, der Testdatensatz aus 28.346. Eine Auflistung aller Probanden, ihrer Cluster-Einteilung und der zugehörigen Kenngrößen des Blickverhaltens sind Anhang A.3 zu entnehmen.



**Abbildung 4.5:** Unterteilung des Gesamtdatensatzes nach der k-Means-Clustermethode in die drei Cluster „Blickbediener“, „Normalbediener“ und „Blindbediener“ (links), Beispiele für Blickverläufe der drei Bedientypen (rechts)

### 4.2.3 Ableiten von Zwischengrößen

Aus den in Tabelle 4.2 dargestellten Parametern können Zwischengrößen abgeleitet werden, die zusätzliche Informationen über die Interaktion zwischen dem Fahrer und der Fahr- und Nebenaufgabe liefern. Hoch [69] beschreibt solche Zwischengrößen als „*Höherwertige Informationsgrößen, die nicht direkt gemessen werden können, sondern durch die Verarbeitung und Kombination*“ anderer Parameter abgeleitet werden. Folgende Zwischengrößen der Primär- und Tertiärinteraktion werden definiert:

#### Zwischengrößen der Primärinteraktion:

Wie in Kapitel 2.1.2 gezeigt wird, hat die Bearbeitung von Nebenaufgaben während der Fahrt einen Einfluss auf verschiedene Parameter der Längs- und Querführung (siehe Tab. 2.1). Daher wird für das hier entwickelte Fahrerzustandsmodell analysiert, ob sich solche Parameter zur Echtzeit-Prädiktion von Blickabwendungen ins CID eignen. Denn eine Zunahme an Lenkkorrekturen hängt möglicherweise mit einem Kontrollblick zur Straße zusammen. Führen die Fahrer mehr Lenkkorrekturen durch, so machen sie dies sehr wahrscheinlich aufgrund einer beobachteten Abweichung der Fahrtrajektorie zum Straßenverlauf. Die in dieser Arbeit verwendeten Kenngrößen zur Bewertung der Lenkaktivität sind die Steering Reversal Rate (SRR), Steering Action Rate (SAR) sowie die Hochfrequenzkomponenten des Lenkwinkelsignals (englisch: High Frequency Components, HFC). Eine ausführliche Herleitung und Beschreibung dieser und weiterer Kenngrößen sind im Forschungsbericht von AIDE [2] sowie in den Arbeiten von Knappe [88] und Rauch et al. [135] zu finden.

**Steering Reversal Rate (SRR):** Die Abstände zwischen zwei Extremwertpaaren im Lenkwinkelsignal  $\Delta\delta$  werden pro definiertem Zeitfenster gezählt (siehe Abb. 4.6). Eine resultierende Winkeldifferenz  $\Delta\delta$  wird jedoch nur gezählt, wenn sie einen definierten Abstands-Schwellwert überschreitet. Im Rahmen von AIDE wurden für visuell-manuelle

Aufgaben zwei oder vier Grad als Abstands-Schwellwert erarbeitet, weshalb hier zwei Grad verwendet werden. Die SRR ergibt sich aus dem Quotienten der Anzahl der Extremwertpaare  $n_{reversal}$  und dem Zeitfenster  $\Delta T$ .

$$SRR = \frac{n_{reversal}}{\Delta T} \quad \left[ \frac{1}{s} \right] \quad (4.9)$$

Die mittlere Blickabwendungsdauer aller Probanden beträgt ca. eine Sekunde (siehe Kap. 4.2.2). Um die Blickabwendungen in Echtzeit messen zu können, wird das Zeitfenster  $\Delta T$  auf die Hälfte einer zu erwartenden Blickabwendungsdauer – also auf 0,5 Sekunden – festgelegt. Folglich werden zur Berechnung der SRR bei jedem Rechenzyklus die Extremwertpaare  $n_{reversal}$  der vergangenen 0,5 Sekunden gezählt. Die **Steering Action Rate (SAR)** berechnet sich – ähnlich wie die SRR – nach Gleichung 4.9 anhand der Lenkwinkelgeschwindigkeit.

**Hochfrequenzkomponenten des Lenksignals (HFC):** Lenkbewegungen im Bereich von 0,35 und 0,6 Hz sind sensitiv bei der Bearbeitung von Nebenaufgaben [88]. Die HFC beschreiben den Anteil dieses Frequenzbandes im gesamten Frequenzspektrum des Lenkwinkelsignals. Zur Berechnung der HFC wird das Lenkwinkelsignal mit einem Tiefpassfilter gefiltert (Butterworth, zweite Ordnung, Eckfrequenz 0,6 Hz). Das resultierende rauschfreie Lenkwinkelsignal wird als Gesamtlenksignal  $P_{gesamt}$  bezeichnet. Eine weitere Filterung mit einem Hochpassfilter (Butterworth, zweite Ordnung, Eckfrequenz 0,35 Hz) ergibt das Signal  $P_{band}$  mit dem sensitiven Frequenzband zwischen 0,35 und 0,6 Hz. Die HFC berechnet sich aus dem Verhältnis dieser beiden Signale:

$$HFC = \frac{P_{band}}{P_{gesamt}} \quad [-] \quad (4.10)$$

Um die HFC alle 10 ms zu berechnen, wird ein Speicher definiert, in dem bei jedem Rechenzyklus die letzten 500 Lenkwinkel-Werte – d. h. in einem Zeitfenster von 0,5 Sekunden – abgespeichert werden. Bei jedem Rechenzyklus wird die zweifache Butterworth-Filterung und Gleichung 4.10 auf die gespeicherten Lenkwinkel-Werte angewendet.

**Gaspedal-Aktivzeit (GAZ):** Sobald die Fahrer das Gaspedal aus der Nullstellung heraus betätigen, startet eine Zeitmessung. Nehmen die Fahrer den Fuß vom Gaspedal, so wird die Zeitmessung zurück auf null gesetzt. Hierdurch wird bei jedem Rechenzyklus die Dauer einer zurückliegenden Gaspedalbetätigung gespeichert ( $t_{GAZ}$  [s]).

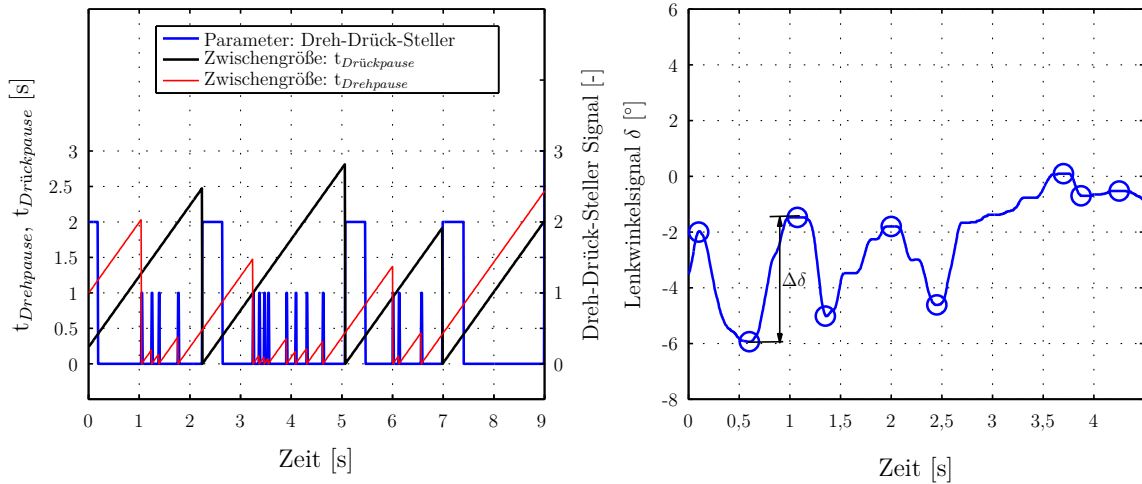
**Zwischengrößen der Tertiärinteraktion:**

Das Signal des Dreh-Drück-Stellers liefert ausschließlich diskrete Events (siehe Abb. 4.3 mitte), die keine Information über den zeitlichen Verlauf einer Bedieneingabe liefern. Daher werden die Zwischengrößen  $t_{Drehpause}$  [s] und  $t_{Drückpause}$  [s] abgeleitet. Sobald die Fahrer aufhören den Dreh-Drück-Steller zu drehen oder zu drücken, wird eine Zeitmessung gestartet (Drehen bezieht sich auf die Zwischengröße  $t_{Drehpause}$ , Drücken auf die Zwischengröße

$t_{Drückpause}$ ). Die Zeitmessung wird zurück auf null gesetzt und beginnt von vorne, sobald die Fahrer wieder den Dreh-Drück-Steller drehen oder drücken (siehe Abb. 4.6 links).

### Sonstige Zwischengröße:

Zusätzlich wird die Zwischengröße  $t_{SpellerDauer}$  [s] definiert. Diese enthält die Dauer der in Kapitel 4.2.1 definierten Prüfsituation. Sobald die Fahrer die Nebenaufgabe beginnen (Spellermenü erscheint) wird die Zeitmessung gestartet.



**Abbildung 4.6:** Abgeleitete Zwischengrößen:  $t_{Drehpause}$  und  $t_{Drückpause}$  (links), Beispiel eines Lenkwinkelsignals zur Berechnung der SRR (rechts).

Alle hier vorgestellten Klassifikatoren sind in der MATLAB-Toolbox Simulink umgesetzt. In Simulink erfolgen das Einlesen des entsprechenden Datensatzes, die Berechnung der Zwischengrößen sowie die eigentliche Klassifikation und deren Bewertung (siehe Anhang A.4). Die Bewertung der Klassifikationsgüte wird anhand des Vergleichs der geschätzten Blick-Klasse mit dem aufgezeichneten Referenzblick über die entsprechende Simulationsdauer vorgenommen. Das Simulink-Programm schätzt in jedem Rechenschritt und mit einer Frequenz von 100 Hz den aktuellen Aufmerksamkeitszustand. Die heuristischen Modelle werden mit der Software SPSS-Modeller der Firma IBM generiert und in Simulink integriert.

### 4.2.4 A-priori Modellierung

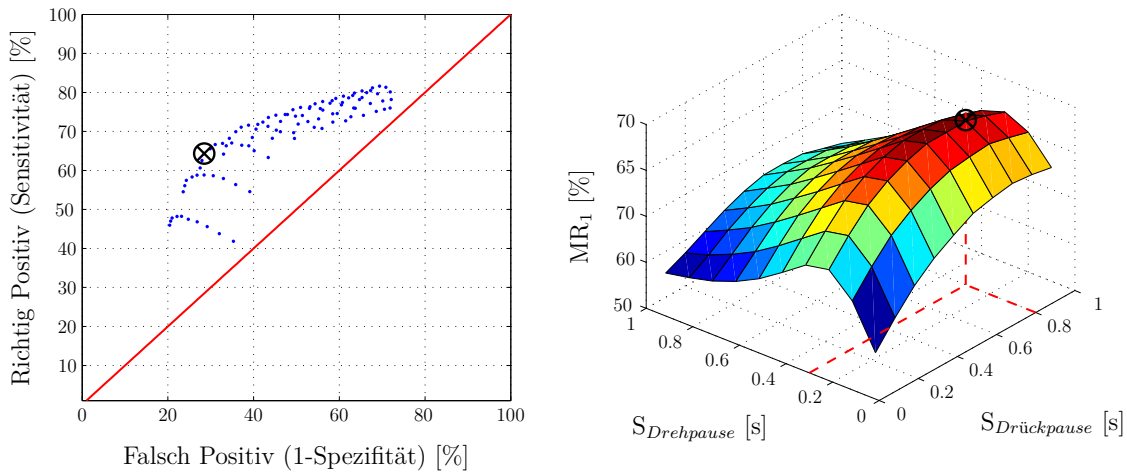
Bei dieser Form der Modellgenerierung werden anhand von Vorwissen oder Beobachtungen einfache „Wenn ... dann - Beziehungen“ aufgestellt. So ist zum Beispiel im Rahmen der Probandenstudie folgendes Muster zu beobachten: Sobald die Fahrer den Dreh-Drück-Steller drehen, um einen Buchstaben im Spellermenü auszuwählen, überwachen sie dies mit einer Blickabwendung ins CID. Hat der Cursor den gewünschten Buchstaben erreicht (siehe Abb. 4.3 oben), so blicken sie zurück zur Fahrbahn, drücken den Dreh-Drück-Steller zur Eingabe quasi „blind“ und machen anschließend einen kurzen Kontrollblick zurück ins CID, um ihre Eingabe zu überprüfen. Die Dauer dieses Kontrollblicks wird hier mit 1,03 Sekunden festgelegt ( $\hat{=}$  mittlerer Blickabwendungsdauer aller Fahrer, siehe Kap. 4.2.2). Folgende Regeln

in Bezug auf die Tertiärinteraktion können zur Schätzung von Blickabwendungen ins CID definiert werden (die Abkürzung S steht für einen Schwellwert) [104]:

- Wenn  $t_{Drehpause} < S_{Drehpause}$  oder
- Wenn  $t_{Drückpause} > S_{Drückpause}$  und  $t_{Drückpause} < (S_{Drückpause} + 1,03 \text{ s})$

... dann CID\_Blick = true.

Um die Schwellwerte  $S_{Drehpause}$  und  $S_{Drückpause}$  zu bestimmen, wird das Modell mit verschiedenen Schwellwert-Kombinationen auf Basis des Trainingsdatensatzes iterativ durchlaufen. Bei jedem Durchlauf werden beide Schwellwerte in 0,1 Schritten von 0 bis 1 Sekunde variiert und die resultierende Richtig Positiv Rate, Falsch Positiv Rate und der  $MR_1$ -Wert berechnet. Wie in Abbildung 4.7 zu erkennen ist, ergibt die Schwellwert-Kombination  $S_{Drehpause} = 0,3$  und  $S_{Drückpause} = 0,8$  einen maximalen  $MR_1$ -Wert von 67,4 %.



**Abbildung 4.7:** Ergebnisse der Kombinationen der  $S_{Drehpause}$  und  $S_{Drückpause}$ , dargestellt als Scatterplot in der ROC (links) und Optimierungsfläche des  $MR_1$  - Werts (rechts);  $\otimes$  ist die optimale Kombination

Die Betätigung des Bremspedals – gemessen über den Bremsdruck  $p_{Brems}$  – ist mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Reaktion auf eine Änderung der Verkehrssituation, weshalb angenommen werden kann, dass die Fahrer in diesem Fall zur Straße blicken. Liegt eine relativ große Änderung des Lenkwinkels vor – gemessen über die Lenkwinkelgeschwindigkeit  $\frac{d\delta}{dt}$  – so ist dies vermutlich auf eine Änderung im Straßenverlauf oder der Verkehrssituation zurückzuführen. In diesem Fall kann angenommen werden, dass die Fahrer zur Straße blicken. Somit können folgende Regeln in Bezug auf die Primärinteraktion zur Schätzung von Straßenblicken definiert werden:

- Wenn  $p_{Brems} > 0$  oder
- Wenn  $\frac{d\delta}{dt} > S_{d\delta/dt}$

... dann CID\_Blick = false.



Da die Prüfsituation eine Folgefahrt auf einer geraden Fahrbahn ist, die Fahrer weder ein Brems- noch ein Ausweichmanöver vornehmen müssen, haben die Regeln der Primärinteraktion nur einen geringen Effekt auf die Klassifikationsgüte des Trainingsdatensatzes. Lediglich ein Fahrer bremst während der Bedieneingabe. Dabei betätigt er das Bremspedal für 2,4 Sekunden, wovon er 1,89 Sekunden zur Straße und 0,51 Sekunden ins CID blickt. Die Klassifikationsgüte  $MR_1$  verbessert sich mit Berücksichtigung des Bremsdrucks geringfügig um 0,2 Prozentpunkte. Die Berücksichtigung der Lenkwinkelgeschwindigkeit ergibt keine Verbesserung. Tabelle 4.3 fasst noch einmal die Klassifikationsgüte des a-Priori Ansatzes „Wenn ... dann - Regeln“ zusammen.

Wenn ... dann - Regeln	Sensitivität [%]	Spezifität [%]	$MR_1$ [%]
nur Tertiärinteraktion	63,7	71,2	67,4
inkl. Primärinteraktion	63,4	71,7	67,6

**Tabelle 4.3:** Klassifikationsgüte der „Wenn ... dann - Regeln“ auf Basis des Trainingsdatensatzes. Bei der Primärinteraktion wird nur der Bremsdruck  $p_{Brems}$  berücksichtigt

### 4.2.5 Heuristische Modellierung

Beim Trainieren der heuristischen Modelle wird die sogenannte k-fache Kreuzvalidierung verwendet. Der Trainingsdatensatz mit N Instanzen wird hierbei in k Teilmengen unterteilt. Zur Modellgenerierung werden k Durchläufe vorgenommen, wobei k - 1 Teilmengen als separate Trainingsmenge und jede verbleibende Teilmenge als Testmenge verwendet wird. Die Klassifikationsgüte des gesamten Trainingsdatensatzes ergibt sich aus dem Mittelwert der Einzelwertungen der k Durchläufe. Im Rahmen dieser Arbeit wird  $k = 10$  gewählt.

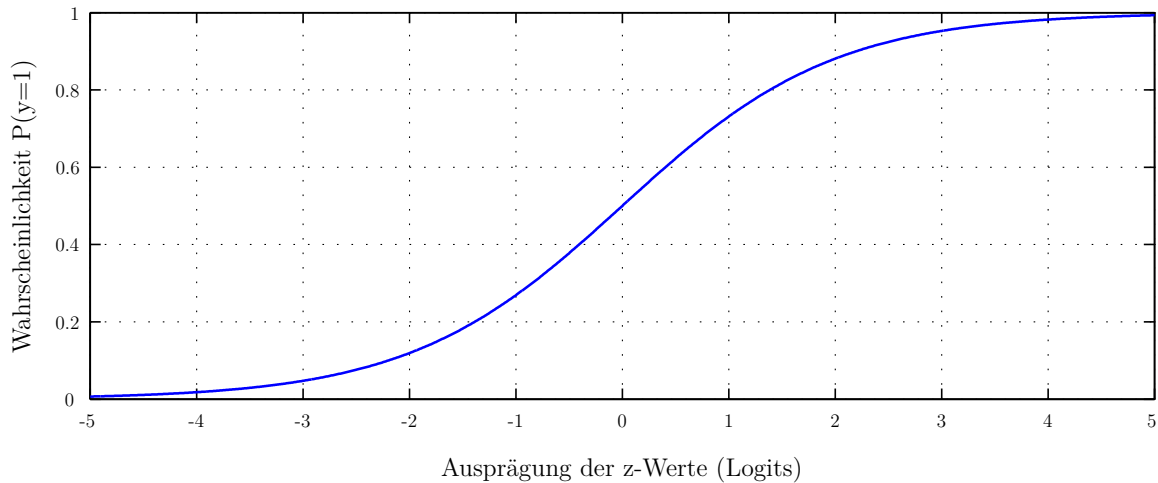
#### Logistische Regression:

Mit Hilfe der Regressionsanalyse können Beziehungen zwischen einer abhängigen ( $\hat{=}$  gesuchte Klasse  $CID\_Blick = true/false$ ) und einer oder mehreren unabhängigen Variablen ( $\hat{=}$  Attribute z. B.  $t_{Drehpause}$ ) festgestellt werden. Für eine dichotomische abhängige Variable mit zwei Ziel-Zuständen eignet sich die Logistische Regression [6]. Bei dieser wird das Ergebnis der linearen multiplen Regression mit Hilfe der logistischen Funktion (siehe Abb. 4.8 und Gl. 4.12) auf einen Wahrscheinlichkeitswert zwischen 0 und 1 normiert. D. h. , das Ergebnis der Logistischen Regression ist hier die Wahrscheinlichkeit für eine Blickabwendung ins CID ( $CID\_Blick = true$ ). Die sogenannten Logits ( $z_k$ -Werte) berechnen sich aus der Summe alle Attribute ( $x_j$ ) multipliziert mit ihren Regressionskoeffizienten ( $\beta_j$ ) und einem Fehlerterm ( $u_k$ ):

$$z_k = \beta_0 + \sum_{j=1}^J \beta_j \cdot x_{jk} + u_k \quad (4.11)$$

Durch Einsetzen der Logits (Gl. 4.11) in die logistische Funktion (Gl. 4.12) ergibt sich die Wahrscheinlichkeit für eine Blickabwendung ins CID:

$$p_k(y = 1) = \frac{1}{1 + e^{-z_k}} \quad (4.12)$$



**Abbildung 4.8:** Verlauf der logistischen Funktion (Gl. 4.12) [6]

Das anhand der Trainingsdaten generierte Regressionsmodell enthält die in Tabelle 4.4 dargestellten neun Attribute. Das Attribut  $t_{SpellerDauer}$  kann aus dem Modell ausgeschlossen werden, da es als einziges Attribut keinen statistisch signifikanten Beitrag zur Vorhersage von Blickabwendungen leistet. Anhand der Eingangs-Attribute kann das gesamte Modell signifikant zwischen einem Straßen- oder CID-Blick unterscheiden ( $\chi^2(9, N = 29.133) = 1.094,84, p < ,01$ ). Jedoch können nur 3,7 % (Cox und Snell R-Quadrat) bis 4,9 % (Nagelkerke R-Quadrat) der Varianz der Zielvariable CID\_Blick aufgeklärt werden.

Attribute	$\beta$	SD	Wald	df	p	Odds Verhältnis
Konstante	-0,631	0,157	16,146	1	0,00	
$t_{Drehpause}$	-0,215	2,39	241,541	1	0,00	0,807
$t_{Drückpause}$	0,085	1,88	56,736	1	0,00	1,088
$t_{SpellerDauer}$	0,000	0,341	0,038	1	0,845	1,000
$t_{GAZ}$	0,007	0,170	26,686	1	0,00	1,007
$d\delta/dt$	-0,076	1,024	184,423	1	0,00	0,926
SAR	-0,123	2,219	87,591	1	0,00	0,884
SRR	-0,260	4,097	118,546	1	0,00	0,771
HFC	2,088	52,580	45,900	1	0,00	8,072
$p_{Brems}$	-129,590	0,002	65,302	1	0,00	0,000

**Tabelle 4.4:** Attribute und Parameter der Logistischen Regression

Die Attribute und ihre zugehörigen Regressionskoeffizienten  $\beta_j$  aus Tabelle 4.4 können nun in Gleichung 4.11 und 4.12 eingesetzt werden. Der Fehlerterm  $u_k$  wird nicht berücksichtigt

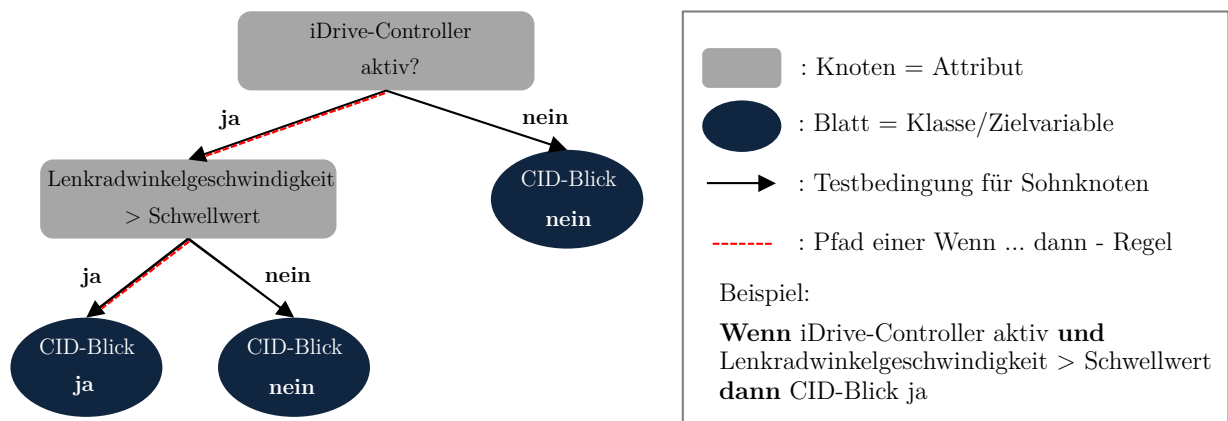
und gleich null gesetzt. Ergibt die Gleichung 4.12 einen Wert größer oder gleich 0,5, so wird dies als Blickabwendung ins CID gewertet, unterhalb von 0,5 als Blick auf die Straße. Die Klassifikationsgüte des Logistischen Regressionsmodells auf Basis des Trainingsdatensatzes ist in Tabelle 4.5 dargestellt.

Log. Regressionsmodell	Sensitivität [%]	Spezifität [%]	MR <sub>1</sub> [%]
siehe Gleichung 4.12	62,8	52,8	57,8

**Tabelle 4.5:** Klassifikationsgüte des Logistischen Regressionsmodells auf Basis des Trainingsdatensatzes

### Entscheidungsbaum:

Entscheidungsbäume veranschaulichen hierarchisch aufeinanderfolgende Entscheidungen zur Klassifikation bestimmter Objekte oder Zustände. Jeder Knoten repräsentiert ein Attribut, und jede Verbindung zu einem Kindknoten oder Blatt stellt einen Test auf dem Attribut des Vaterknotens dar (siehe Abb. 4.9). Ein Blatt repräsentiert eine der Klassen. Die maximale Anzahl an Eltern- und Kindknoten zwischen dem ersten Attribut, der sogenannten Wurzel, und dem letzten Blatt ist die Baumtiefe. Jeder Pfad von der Wurzel bis zu einem Blatt entspricht einer Regelmenge in der Form von „Wenn ... dann - Regeln“.



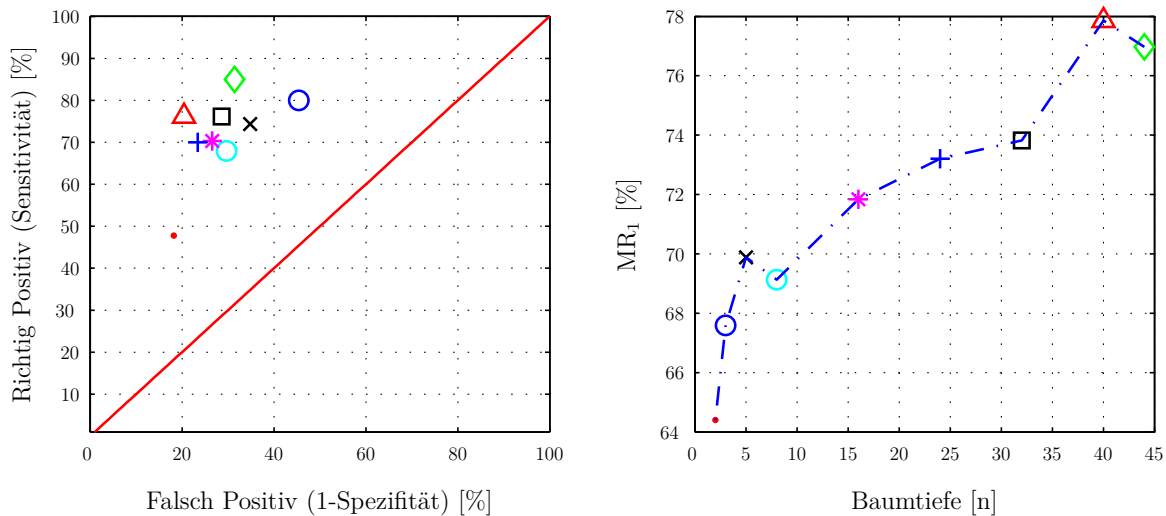
**Abbildung 4.9:** Struktur und Elemente eines Entscheidungsbaums

Die geläufigsten Algorithmen zum Trainieren eines Entscheidungsbaums sind der CHAID (Chi-square Automatic Interaction Detectors), der CART (Classification And Regression Trees) und der C5.0.

In dieser Arbeit wird der C5.0-Algorithmus verwendet, da er kategoriale Klassen vorher-sagen und metrische Attribute verarbeiten kann sowie zahlreiche Optimierungsverfahren enthält, wie z. B. das Weglassen von Knoten mit geringem Informationsgewinn (dies wird als Pruning bezeichnet). Bei dem C5.0-Verfahren wird zuerst der sogenannte Informationsgewinn jedes einzelnen Attributs berechnet – also wie viel jedes Attribut zur Vorhersage einer Klasse beiträgt. Die Stichprobe wird gemäß der beiden Klassen anhand des Attributs mit dem maximalen Informationsgewinn unterteilt. Jede durch die erste Aufteilung definierte Unterstichprobe wird dann weiter auf Basis des Attributs mit dem nächst höheren

Informationsgewinn aufgeteilt. Das Verfahren wird so lange fortgesetzt, bis die Unterstichproben nicht weiter aufgeteilt werden können (siehe Beispiel im Anhang A.5 [90]).

Wie beim Logistischen Regressionsmodell werden – bis auf die Dauer der Nebenaufgabe  $t_{SpellerDauer}$  – alle Attribute aus Tabelle 4.4 für die Modellierung verwendet. Die im SPSS-Modeller generierten Regelmengen (siehe Abb. 6 von Anhang A.6) werden in die Programmiersprache *c* umgewandelt und als *s-function* in die Simulink-Umgebung eingebunden. Hierbei werden mehrere Bäume mit unterschiedlichen Baumtiefen generiert und deren Klassifikationsgüte bewertet (siehe Abb. 4.10). Bei kleineren Baumtiefen werden Attribute mit geringerem Informationsgewinn von der Modellierung ausgeschlossen.



**Abbildung 4.10:** Scatterplot in der ROC (links) und MR<sub>1</sub>-Werte der Entscheidungsbäume in Abhängigkeit ihrer Baumtiefe (rechts)

Wie in Abbildung 4.10 zu erkennen ist, hat die Größe des Entscheidungsbaums einen Einfluss auf die Klassifikationsgüte. Die Entscheidungsbäume mit der geringsten (Baumtiefe  $n = 2$  und 2 Regelmengen) und höchsten Klassifikationsgüte (Baumtiefe  $n = 40$  und 265 Regelmengen) sind in Tabelle 4.6 gegenübergestellt. Ein Beispiel für eine generierte Regelmenge und dem hieraus abgeleiteten Baum ist dem Anhang A.6 zu entnehmen.

Entscheidungsbaum C5.0	Sensitivität [%]	Spezifität [%]	MR <sub>1</sub> [%]
Baumtiefe $n=2$	47,4	81,1	64,3
Baumtiefe $n=40$	75,8	79,6	77,7

**Tabelle 4.6:** Klassifikationsgüte des Entscheidungsbaums C5.0 auf Basis des Trainingsdatensatzes

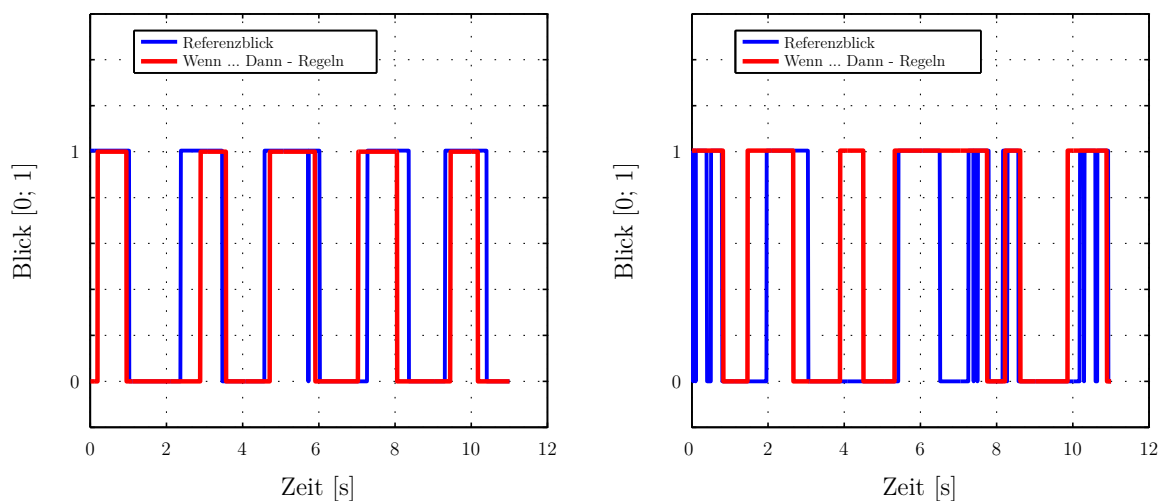
### 4.2.6 Evaluierung der Modelle

Die in Kapitel 4.2.4 und 4.2.5 entwickelten Klassifikatoren können zusätzlich mit dem unabhängigen Testdatensatz auf ihre Klassifikationsgüte getestet werden. Hierdurch wird

die Robustheit der Klassifikatoren bei unbekanntem Daten bewertet. Eine Auflistung der Klassifikationsgüte aller Modelle, aufgeschlüsselt nach einzelnen Probanden, ist in Anhang A.7 zu finden.

### Wenn ... dann - Regeln:

Mit Hilfe der „Wenn ... dann - Regeln“ kann beim gesamten Testdatensatz eine Blickabwendung ins CID mit einem  $MR_1$ -Wert von 69,5 % geschätzt werden. Eine Betrachtung der Klassifikationsgüte bei jedem einzelnen der 14 Probanden zeigt, dass der kleinste  $MR_1$ -Wert bei 63,9 % und der größte bei 80,3 % liegt (siehe Abb. 4.11). Die Standardabweichung der  $MR_1$ -Werte aller Fahrer beträgt 4,9 %.



**Abbildung 4.11:** Beispiel für Blickverläufe zweier Fahrer, deren Blickabwendungen durch die „Wenn ... dann - Regeln“ mit einem  $MR_1$ -Wert von 80,3 % (links) bzw. 63,9 % (rechts) vorhergesagt werden

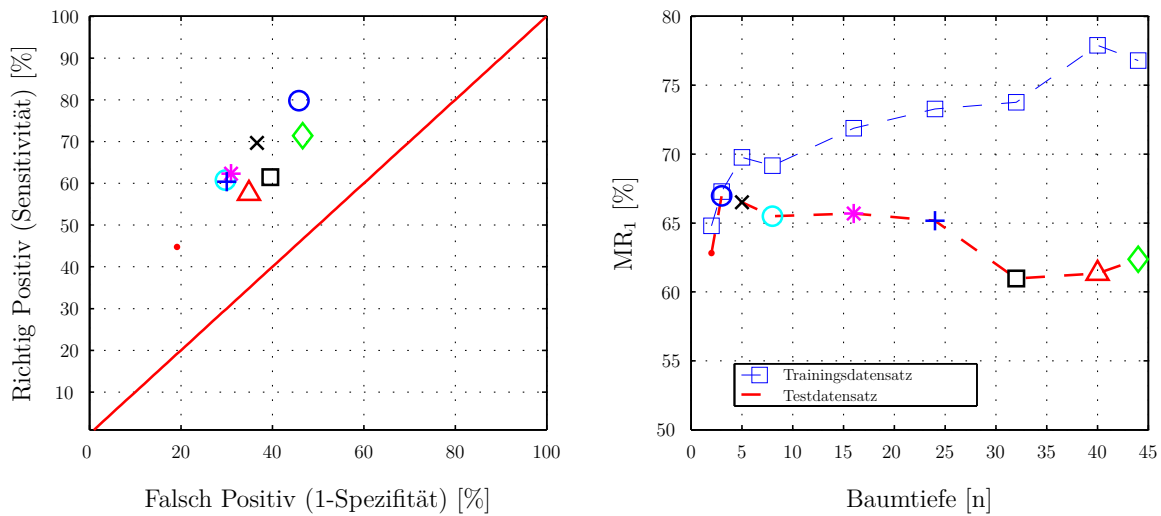
### Logistisches Regressionsmodell:

Das Logistische Regressionsmodell erreicht beim Testdatensatz einen  $MR_1$ -Wert von 55,3 %. Eine Einzelbetrachtung der Probanden zeigt, dass der kleinste  $MR_1$ -Wert bei 47,4 % und der größte bei 63,7 % liegt. Die Standardabweichung der  $MR_1$ -Werte aller Fahrer beträgt 5,1 %.

### Entscheidungsbaum C5.0:

Alle neun mit verschiedenen Baumtiefen generierten Entscheidungsäume können mit dem Testdatensatz hinsichtlich ihrer Klassifikationsgüte bewertet werden. In Abbildung 4.12 (rechts) wird gezeigt, dass bereits ab einer Baumtiefe von  $n = 3$  eine Überanpassung vorliegt. Die Klassifikationsgüte nimmt beim Trainingsdatensatz mit Erhöhung der Baumtiefe zu, wogegen die Klassifikationsgüte beim Testdatensatz abnimmt. Daher wird zur weiteren Betrachtung ausschließlich der Entscheidungsbaum mit der Baumtiefe  $n = 3$  betrachtet (Struktur und Regelmenge, siehe Anhang A.6).

Der Entscheidungsbaum erreicht beim Testdatensatz einem  $MR_1$ -Wert von 67,0 %. Eine



**Abbildung 4.12:** Scatterplot in der ROC (links) und  $MR_1$ -Werte der Entscheidungsbäume in Abhängigkeit ihrer Baumtiefe auf Basis des Trainings- und Testdatensatzes (rechts)

Einzelbetrachtung der Probanden zeigt, dass der kleinste  $MR_1$ -Wert bei 59,4 % und der größte bei 74,0 % lag. Die Standardabweichung der  $MR_1$ -Werte aller Fahrer liegt bei 7,0 %.

Tabelle 4.7 fasst noch einmal die Klassifikationsgüte aller Modelle zusammen. Die rechte Spalte gibt die Verbesserung (>0) oder Verschlechterung (<0) der Klassifikationsgüte im Vergleich zum Trainingsdatensatz in Prozentpunkten an.

Verfahren	Sens. [%]	Spez. [%]	$MR_1$ [%]	$\Delta MR_1$ [ $\Delta$ %]
Wenn ... dann - Regeln	65,3	73,8	69,5	+ 1,9
Log. Regressionsmodell	58,0	52,6	55,3	- 2,5
Entscheidungsbaum C 5.0	79,8	54,2	67,0	- 0,3

**Tabelle 4.7:** Gegenüberstellung der Klassifikationsgüte aller Modelle

### 4.3 Zusammenfassung und Diskussion

Für die vorgestellte Prüfsituation kann gezeigt werden, dass Blickabwendungen ins CID mit einer Klassifikationsgüte ( $MR_1$ ) von bis zu ca. 70 % durch ein indirektes Verfahren vorhergesagt werden können. Dieses Ergebnis lässt darauf schließen, dass die indirekte Messung des visuellen Aufmerksamkeitszustands in Echtzeit funktioniert und somit für die Anpassung optischer Warnausgaben genutzt werden kann.

Die geringste Klassifikationsgüte zeigt das Logistische Regressionsmodell. Mit einem  $MR_1$ -Wert von 55,5 % verhält sich der Klassifikator annähernd wie ein Zufallsprozess. Hinzu kommt, dass das Modell nur etwa 5 % der Varianz im Trainingsdatensatz aufklären kann.

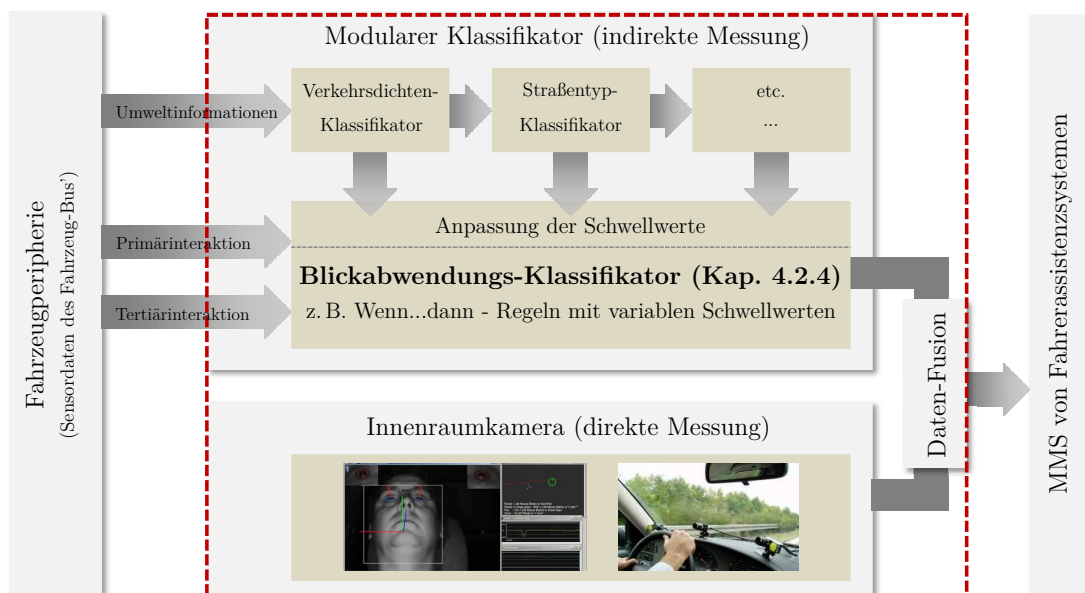
Dennoch deuten die Vorzeichen der Regressionskoeffizienten  $\beta$  aus Tabelle 4.4 darauf hin, dass tendenziell ähnliche Zusammenhänge zwischen der Primärinteraktion und der Wahrscheinlichkeit einer Blickabwendung bestehen, wie sie in der Literatur beschrieben werden (siehe Tab. 2.1). Umso höher beispielsweise die Lenkaktivität (z. B.  $d\delta/dt$ , SAR, SRR) bzw. je höher der Bremspedaldruck  $p_{Brems}$  ist, desto niedriger ist die Wahrscheinlichkeit einer Blickabwendung ins CID (da  $\beta < 0$ ).

Eine weit höhere Klassifikationsgüte erreicht der Entscheidungsbaum mit einer Baumtiefe von  $n = 3$  ( $MR_1$ -Wert = 67 %). Die Klassifikationsgüte steigt zwar beim Trainingsdatensatz mit zunehmender Baumtiefe an, unterscheidet sich jedoch bei großen Baumtiefen um bis zu 17 Prozentpunkte von der Klassifikationsgüte, die auf Basis des Testdatensatzes gemessen wird. Somit liegt hier eine Überanpassung vor. Eine mögliche Ursache hierfür ist die hohe Varianz im Blickverhalten (siehe Abb. 4.5). Trotz der gleichverteilten Anzahl verschiedener Bedientypen im Trainings- und Testdatensatz scheint das Blick-, Fahr- und Bedienverhalten in beiden Datensätzen zu inhomogen und unterschiedlich zu sein. Ab einer Baumtiefe von  $n > 3$  optimiert der C5.0-Algorithmus den Entscheidungsbaum zu sehr auf die Daten der Probanden des Trainingsdatensatzes.

Mit einem  $MR_1$ -Wert von 69,5 % erreichen die „Wenn ... dann - Regeln“ die höchste Klassifikationsgüte. Alleine die Analyse der Dreh- und Drückpausen liefert den entscheidenden Beitrag zur korrekten Schätzung von Blickabwendungen. Die Berücksichtigung der Primärinteraktion – also des Bremspedaldrucks und der Lenkwinkelgeschwindigkeit – hat in der vorliegenden Stichprobe keinen großen Einfluss auf die Klassifikationsgüte. Dies liegt jedoch an der Gestaltung der Prüfsituation, da diese weder Brems- noch Ausweichmanöver erfordert. Neben der hohen Klassifikationsgüte haben die „Wenn ... dann - Regeln“ auch den Vorteil, eine geringe Modell-Komplexität zu besitzen (insgesamt vier Regeln).

Somit ist das a-Priori Modell besser als die hier entwickelten heuristischen Modelle für die Schätzung von Blickabwendungen ins CID geeignet. Lediglich der Entscheidungsbaum mit einer Baumtiefe von  $n = 3$  liefert eine ausreichend hohe und robuste Klassifikationsgüte. Dieser besteht jedoch ausschließlich aus den zwei Attributen  $t_{Drehpause}$  und  $t_{Drückpause}$ , und ähnelt dem Aufbau der „Wenn ... dann - Regeln“. Beim Entscheidungsbaum liegen die Schwellwerte  $S_{Drehpause}$  und  $S_{Drückpause}$  bei 0,51 bzw. 0,29 Sekunden, bei den „Wenn ... dann - Regeln“ bei 0,3 bzw. 0,8 Sekunden (vgl. Aufbau der Wenn ... dann - Regeln in Kap. 4.2.4 und des Entscheidungsbaums in Anhang A.6). Die hohe Ähnlichkeit dieses Entscheidungsbaums mit den „Wenn ... dann - Regeln“ deutet darauf hin, dass die aus der Literatur bekannten Lenkmaße keine entscheidenden Informationen zur Vorhersage von Blickabwendungen liefern. Denn alle heuristischen Modelle, die diese Attribute verwenden, weisen eine geringere Klassifikationsgüte als das einfache a-Priori Modell auf. Den größten Beitrag zur Vorhersage von Blickabwendungen ins CID liefern somit die Attribute der Tertiärinteraktion. Im Vergleich zu den Lernverfahren haben die „Wenn ... dann - Regeln“ somit gute Ergebnisse erzielt, sind dabei einfach implementierbar und nachvollziehbar, weshalb sich der Mehraufwand der heuristischen Modellierung in diesem Fall nicht lohnt. Diese Aussage kann jedoch nur für die hier verwendete Prüfsituation und Nebenaufgabe getroffen werden und lässt sich nicht generalisieren. Wie sich die Fahrerzustandsmodelle in anderen Verkehrssituationen verhalten, kann nicht beantwortet werden.

Ein Lösungsansatz zur Übertragung der Validität der Modelle auf andere Verkehrssituationen stellt ein modulares Fahrerzustandsmodell mit mehreren Einzel-Klassifikatoren dar (siehe Abb. 4.13). Diese Einzel-Klassifikatoren, die die Verkehrsdichte, den Straßentyp, usw. bewerten, erhöhen die Robustheit des Fahrerzustandsmodells, indem sie die Schwellwerte des eigentlichen Blickabwendungs-Klassifikators auf die erkannte Verkehrssituation anpassen. Beispielsweise werden bei einer hohen Verkehrsdichte kürzere Blickabwendungsdauern als bei einer niedrigen Verkehrsdichte erwartet. Erkennt der Verkehrsdichten-Klassifikator zum Beispiel eine Zunahme der Verkehrsdichte (anhand einer steigenden Anzahl von Fahrzeugen im direkten Umfeld), so wird der Schwellwert  $S_{Drehpause}$  verringert, wodurch kürzere Blickabwendungszeiten geschätzt werden. Eine weitere Verbesserung der Klassifikationsgüte stellt ein hybrides Fahrerzustandsmodell, das aus der Kombination der direkten und indirekten Verfahren besteht, dar. Hierdurch können die Schwächen einer Innenraumkamera durch das indirekte Verfahren kompensiert werden. Blicken die Fahrer ins CID, so senkt sich ihr Blick nach unten, wodurch die Pupille durch das Augenlid und die Wimpern teilweise verdeckt werden kann. In diesem Fall wird bei einem Kameraaufbau, wie er in Abbildung 4.13 dargestellt ist, die Pupille nicht mehr ausreichend genau erkannt, wodurch die Qualität der Blickerfassung abnehmen kann. Dies kann durch eines der hier entwickelten indirekten Verfahren ausgeglichen werden.



**Abbildung 4.13:** Hybrides Fahrerzustandsmodell: Kombination direkter und indirekter Verfahren zur Erfassung des visuellen Aufmerksamkeitszustands (Quelle Bilder: Internet)

Abschließend lässt sich festhalten, dass die hier vorgestellten indirekten Verfahren die Anpassung von Warnausgaben ermöglichen. Dabei schätzen diese neuartigen Verfahren im Vergleich zu bestehenden Ansätzen ausschließlich den visuellen Aufmerksamkeitszustand in Echtzeit. Die Kombination dieser indirekten Verfahren mit den Daten einer Innenraumkamera wird als ein vielversprechender Ansatz angesehen.



---

# Entwicklung und Bewertung von Warnkonzepten für die Längsführung

---

Nachdem gezeigt wurde, wie eine Blickabwendung ins CID gemessen werden kann, wird im Folgenden der Frage aus Kapitel 3.5.1 nachgegangen:

*Wie muss für den Fall einer Blickabwendung des Fahrers ins CID die Vorwarnung einer Auffahrwarnung angepasst werden, damit die Aufmerksamkeit vom Anzeigeort der Nebenaufgabe (CID) schnell und automatisch auf die Gefahr gerichtet wird?*

Die in diesem Kapitel vorgestellten fahrerabhängigen Warnkonzepte werden somit nur bei einem Blick ins CID ausgelöst. Sie sind also als eine zusätzliche Unterstützung für den Fahrer bei Blickabwendung zu verstehen und nicht als alleinstehende Warnkonzepte.

### 5.1 Entwicklung fahrerabhängiger Warnstrategien

Die in diesem Kapitel entwickelten Warnstrategien sollen einen Vorwarn-Charakter haben. Das bedeutet, dass der Fahrer dezent und nicht zu aufdringlich auf die bevorstehende Gefahr hingewiesen werden soll. Der Fokus liegt hier somit auf der optischen Modalität, da haptische oder akustische Warnmeldungen in dieser Phase als zu aufdringlich empfunden werden [100]. Aufgrund begrenzter Aufmerksamkeitskapazitäten bei Doppelaufgaben (siehe Ressourcenmodelle, Kap. 2.2.1) sollen die Warnausgaben eine schnelle Ausrichtung der Aufmerksamkeit vom Ort der Nebenaufgabe auf die bevorstehende Konfliktsituation bewirken. Demnach sollte die Aufmerksamkeitssteuerung bestimmten Reiz-Reaktions-Automatismen folgen, die wenig kognitive Ressourcen benötigen und automatisch ablaufen

(unterste Ebene des Handlungsmodells von Rasmussen). Die hier vorgestellten Warnkonzepte bestehen daher aus einfachen unimodalen Hinweisreizen, die keine Interpretation des Fahrers erfordern.

Für die Ausrichtung der Aufmerksamkeit bei einer Blickabwendung ins CID ergibt sich folgender Lösungsraum:

1. Ein Reiz wird dort ausgegeben, wo der Blickfokus des Fahrers ist (hier CID). Der angezeigte Reiz motiviert den Fahrer, zurück auf die Fahrbahn zu blicken. Hierbei kann der Fahrer nur mit Hilfe einer spezifischen Anzeige im CID (Symbol, Pfeil, Text, usw.) motiviert werden, zurück zur Fahrbahn zu blicken. Da dies nicht den oben aufgeführten Anforderungen entspricht, wird diese Warnstrategie nicht weiter verfolgt.
2. Ein Reiz aus der Richtung der Gefahr zieht die Aufmerksamkeit auf sich (Periphere Blickführung, Kap. 5.1.1). Wie in Kapitel 3.3.2 gezeigt, verursachen richtungsspezifische Hinweisreize eine schnelle Ausrichtung der Aufmerksamkeit und sind daher Gegenstand dieser Arbeit. Bereits im Forschungsprojekt AKTIV [3] und in der Arbeit von Maier et al. [107] wurde die Wirksamkeit solcher peripherer Hinweisreize im Fahrzeug nachgewiesen. Hierfür wurde in der Scheibenwurzel eine LED-Leiste integriert, die bei Kollisionsgefahr hell aufleuchtete. Das in dieser Arbeit untersuchte Warnkonzept basiert jedoch auf der HUD-Technologie.
3. Ein bewegter Reiz, der im Aufmerksamkeitsfokus beginnt und sich in die Richtung der Gefahr bewegt, lenkt die Aufmerksamkeit auf die Fahrbahn (Animierte Blickführung, Kap. 5.1.2). Bis auf wenige Grundlagenuntersuchungen [126] gibt es hinsichtlich dieser Warnstrategie keine bekannten Ergebnisse aus dem Fahrerassistenzbereich. Daher ist dieses neuartige Prinzip der Aufmerksamkeitslenkung Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit.

In den folgenden zwei Unterkapiteln werden aus der zweiten und dritten Warnstrategie konkrete Warnkonzepte abgeleitet und spezifiziert.

### 5.1.1 Warnstrategie „Periphere Blickführung“

Durch einen optischen Reiz im peripheren Sichtfeld soll die Aufmerksamkeit unmittelbar in die Richtung der Fahrbahn gelenkt werden. Demzufolge wird die Variante „**HUD**“ umgesetzt, bei der die gesamte HUD-Fläche (ca. 21 x 9 cm, B x H) mit einer Blinkfrequenz von 3,33 Hz (On-Off-Ratio: 1:1) aufleuchtet (Auslegung nach [65]). Bei jedem Blinkzyklus entsteht ein rotes Rechteck im Ursprung und vergrößert sich auf die gesamte HUD-Fläche. Nach den Gestaltungsaspekten aus Kapitel 3.3.1 ist diese Warnausgabe sowohl richtungsspezifisch (objektreferenziert) als auch dynamisch. Die Dynamik bezieht sich jedoch ausschließlich auf die Reizintensität (Blinkfrequenz, Darstellungsgröße).

### 5.1.2 Warnstrategie „Animierte Blickführung“

Bei dieser Warnstrategie wird der Blick durch eine durchgehende Animation vom CID bis zur Straße geführt. Hierfür verjüngt sich das angezeigte CID-Bild zu einem roten Punkt, der sich innerhalb des Displays in die linke obere Ecke und somit in Richtung Frontscheibe bewegt und über ein LED-Laufflicht bis zur Scheibenwurzel fortgeführt wird (ca. 350 ms Animationsdauer). Das LED-Laufflicht besteht aus fünf LEDs, die in einer Reihe in die I-Tafel integriert sind und nacheinander für 40 ms aufleuchten, jedoch erst, nachdem die CID Animation beendet ist [105]. Der Fahrer bekommt den Eindruck einer fließenden Bewegung zwischen CID-Animation und LED-Laufflicht, welche den Blick in einer glatten Augenfolgebewegung (smooth pursuit) mit sich ziehen soll (Warnvariante „**LED**“). Dieses Warnkonzept beruht auf dem Prinzip der Phi-Bewegung. Das Auge nimmt ab einer bestimmten Geschwindigkeit (30 - 60 ms) aufeinanderfolgende Bilder nicht mehr einzeln, sondern als Teilbewegung wahr. Die durch Einzelbilder erzeugte Positionsänderung wird als durchgehende Bewegung wahrgenommen.

Um den spezifischen Nutzen der LEDs zu zeigen, wird ein zusätzliches Warnkonzept getestet, das nur aus der Animation im CID besteht (Warnvariante „**CID**“). Die gesamte Animationsdauer dieser Warnvariante beträgt 150 ms. Beide Warnvarianten haben nach Kapitel 3.3.1 zum Auslösezeitpunkt keine Richtungsspezifität. Erst im weiteren Verlauf erhalten die Warngaben über die Dimension „Dynamik“ ihre „Richtungsspezifität“ (Änderung des Anzeigeorts über die Zeit).

In der im weiteren Verlauf beschriebenen Fahrsimulatorstudie wird als Baseline die Vorwarnung der aktuellen BMW 7er Serie verwendet [15]. Bei dieser leuchtet ein rotes Fahrzeugsymbol im Kombiinstrument und HUD auf (siehe Abb. 5.1). Der Vergleich zwischen der Serienvariante („**Baseline**“) und den drei neuartigen Warnkonzepten soll die Wirksamkeit und den Mehrwert von fahrerabhängigen Warnstrategien zeigen.

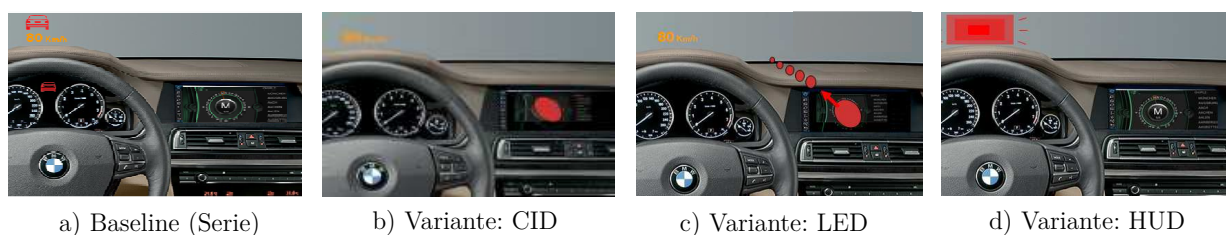


Abbildung 5.1: Untersuchte Warnkonzepte

## 5.2 Fragestellungen und Hypothesengenerierung

Im Folgenden werden zu den drei Datenebenen Blick-, Fahrverhalten und subjektive Bewertung, jeweils Hauptfragestellungen und die daraus resultierenden Hypothesen erarbeitet.

### 5.2.1 Blickverhalten

Ziel der Untersuchung des Blickverhaltens ist es, den Effekt der Warnausgaben auf die visuelle Aufmerksamkeitssteuerung herauszufinden. Durch die Analyse der Augenbewegungen können Aussagen über die Blickstrategie (Blickwege, Fixationen), Verweildauern in entsprechenden AOIs oder Blickreaktionszeiten (z. B. Zeitdauer bis Sakkade) getroffen werden.

**Fragestellung 1:** *Welches Blickverhalten bewirken die einzelnen Warnkonzepte?*

#### **Hypothesengenerierung:**

Die optische Warnausgabe des Serienwarnkonzepts (Baseline) liegt zwar noch im peripheren Sichtfeld, jedoch ist die Reizintensität durch die kleinere Anzeigefläche im Vergleich zur Variante *LED* und *HUD* geringer. Da Bewegungen, Größen- und Intensitätsänderungen optischer Reize im peripheren Sichtfeld stark aufmerksamkeitsbindend sind, bei der *HUD*-Variante eine Größen- und Intensitätsänderung und bei der *LED*-Variante eine Bewegung im peripheren Sichtfeld erfolgt, ergeben sich folgende Hypothesen:

**Hypothese 1a:** Die *HUD*-Variante führt zu einer schnelleren Ausrichtung der Aufmerksamkeit in Richtung der Gefahr als die *Baseline*.

**Hypothese 1b:** Die *LED*-Variante führt zu einer schnelleren Ausrichtung der Aufmerksamkeit in Richtung der Gefahr als die *Baseline*.

Es wird angenommen, dass der animierte Reiz der *CID*-Variante aufgrund des Abstands zwischen *CID* und Fahrbahn alleine nicht ausreicht, um den Blick bis zur Straße zu führen. So ergibt sich die Hypothese:

**Hypothese 1c:** Die *CID*-Variante führt zu einer langsameren Ausrichtung der Aufmerksamkeit in Richtung der Gefahr als die *Baseline*.

Die zu erwartende Blickstrategie (Blickwege, Fixationen) lässt sich nicht theoretisch ableiten, weshalb sie rein explorativ untersucht wird.

### 5.2.2 Fahrverhalten

Das Fahrverhalten beschreibt hier, wie der Fahrer die primäre Fahraufgabe über Lenkeingriffe oder Gas- und Bremspedal-Betätigungen erfüllt. Im Bezug auf die anfangs vorgestellten Warnkonzepte wird der Einfluss der Warnausgaben auf den Zeitpunkt oder das Ausmaß einer entsprechenden Lenk-, Gas- oder Bremspedal-Betätigung untersucht.

**Fragestellung 2:** *Welches Fahrverhalten bewirken die einzelnen Warnkonzepte?*

#### **Hypothesengenerierung:**

Da angenommen wird, dass die Varianten *LED* und *HUD* zu einer schnelleren Ausrichtung der Aufmerksamkeit führen, sollte der Fahrer die Gefahr anders als bei der *Baseline* früher wahrnehmen, weshalb folgende Hypothesen angenommen werden:

**Hypothese 2a:** Die *HUD*-Variante führt zu einer früheren Bremsreaktion als die *Baseline*.

**Hypothese 2b:** Die *LED*-Variante führt zu einer früheren Bremsreaktion als die *Baseline*.

Analog zu der vorangegangenen Argumentation wird aufgrund der Hypothese 1c auch für die *CID*-Variante erwartet:

**Hypothese 2c:** Die *CID*-Variante führt zu einer späteren Bremsreaktion als die *Baseline*.

Welchen Einfluss die Warnkonzepte auf die Stärke und Dauer der Bremspedalbetätigung haben, hängt davon ab, wie kritisch die Situation erlebt wird. Je später eine Gefahr wahrgenommen wird, desto kritischer wird sie empfunden, was zu einer stärkeren oder schnelleren Bremsreaktion führen kann [115]. Da der Ablauf der Auffahrsituation im Simulatorversuch über alle Probanden hinweg konstant gehalten werden soll, kann hier nur die Art der Warnausgabe einen Einfluss auf das Kritikalitätsempfinden haben. Darüber hinaus wird angenommen, dass bei der *Baseline* und der *CID*-Variante das Vorderfahrzeug später wahrgenommen wird, weshalb folgende Hypothesen gelten:

**Hypothese 2d:** Die *Baseline* führt zu einer stärkeren Bremspedalbetätigung als die *LED*- und *HUD*-Variante.

**Hypothese 2e:** Die *CID*-Variante führt zu einer stärkeren Bremspedalbetätigung als die *LED*- und *HUD*-Variante.

**Hypothese 2f:** Die *Baseline* führt zu einer kürzeren Bremspedalbetätigung als die *LED*- und *HUD*-Variante.

**Hypothese 2g:** Die *CID*-Variante führt zu einer kürzeren Bremspedalbetätigung als die *LED*- und *HUD*-Variante.

### 5.2.3 Subjektive Bewertung

Die Analyse subjektiver Bewertungen soll aufdecken, welche Aspekte der Warnkonzepte von den Fahrern bewusst wahrgenommen werden. Hierbei erfolgt die Analyse nicht hypothesengeleitet, sondern rein explorativ. Grundsätzlich soll die folgende Fragestellung beantwortet werden:

**Fragestellung 3:** *Was nehmen die Fahrer von den Warnkonzepten wahr?*

## 5.3 Bewertungsmethodik

Die hier aufgestellten Hypothesen und Fragestellungen werden im Rahmen einer Fahr Simulatorstudie geprüft bzw. untersucht<sup>1</sup>. Im Folgenden wird die technische Umsetzung der Warnkonzepte im statischen Fahr Simulator beschrieben und eine Methodik zur Bewertung

<sup>1</sup>Der Autor dankt Dipl.-Kffr., M.Sc. Nicole Kühnpast für die Unterstützung bei der Versuchsdurchführung und -auswertung.

der Wirksamkeit der Warnkonzepte vorgestellt. Der Aufbau des hier verwendeten Fahr-  
simulators entspricht der Beschreibung aus Kapitel 4.2.1.

### 5.3.1 Technische Umsetzung

Die Darstellung der Warnkonzepte erfolgt mit Hilfe von Floris. Ein MMI-PC stellt sowohl  
die Inhalte im Kombiinstrument als auch im HUD dar. Ein weiterer Rechner sorgt für  
die Darstellung der Nebenaufgabe im CID. Im Folgenden werden die zur Darstellung der  
anfangs beschriebenen Warnkonzepte notwendigen Software- und Hardwareerweiterungen  
im Fahrimulator beschrieben:

#### HUD Aufbau:

Ein Projektor vor der Sitzkiste simuliert ein HUD (siehe Abb. 5.2). Das Bild wird auf eine  
weiße Kunststoff-Fläche projiziert und mit Hilfe einer Combiner-Scheibe in das Sichtfeld  
der Versuchspersonen gespiegelt, so dass es in einer Entfernung von ca. vier Metern er-  
scheint. Dieser Aufbau hat nahezu keine Eyebox und ermöglicht ein Rapid Prototyping  
von neuartigen Anzeigen.

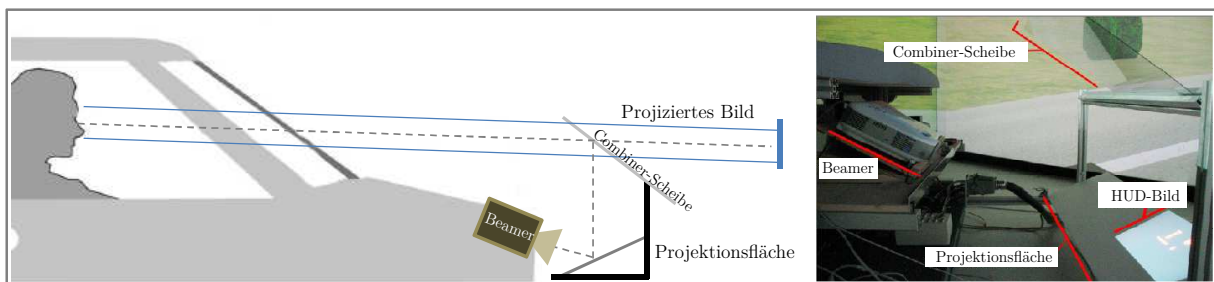
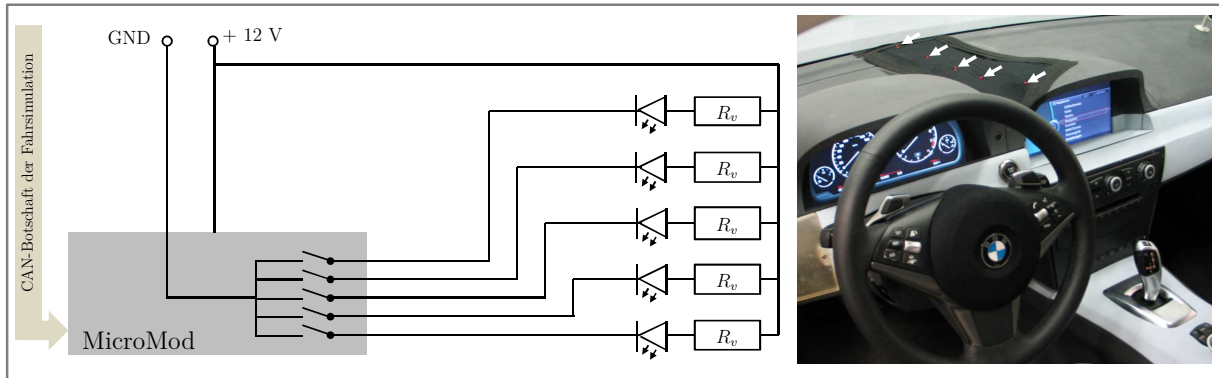


Abbildung 5.2: HUD-Aufbau im Fahrimulator [113]

#### LED Integration:

Fünf LEDs mit einer Lichtstärke von 30 *mcd* sind auf der I- Tafel als Lichtleiter verbaut  
[87]. Die LEDs sind in einem Abstand von ca. 8 - 12 cm mit Klebeband auf dem Ar-  
maturen Brett zwischen CID und Scheibenwurzel befestigt (siehe Abb. 5.3). Der Abstand  
zwischen den LEDs nimmt in der Nähe der Scheibenwurzel zu (+ 4 cm), so dass aus der  
Perspektive des Fahrers der Eindruck einer gleichmäßig verteilten LED-Kette entsteht.  
Durch eine Bohrung hinter der CID-Hutze ist die Verkabelung in das Innere der Sitzkiste  
geführt. Mit einem schwarzen Nylonstoff sind die Kontakte und Kabel überdeckt, damit  
den Probanden die Hardwareerweiterung im Versuch nicht auffällt. Die Ansteuerung der  
LEDs erfolgt über CAN-Botschaften, die in der Co-Simulation generiert werden (Warnko-  
ordinator, siehe S. 71). Die CAN-Botschaften interpretiert ein sogenanntes Micromod, ein  
universeller CAN-Controller der Firma PEAK-Systems [124], der über Schalten der Masse  
an den Ausgangspins die entsprechende LED mit 12 V versorgt. Da die LEDs für eine Lei-  
stung von 0,085 Watt ausgelegt sind, werden Vorwiderstände von  $R_v = 400 \Omega$  vorgeschaltet  
[50].



**Abbildung 5.3:** Elektrische Schaltung des LED-Laufflichts (links), Integration der LEDs auf der I-Tafel (rechts)

#### Animation im CID:

Im Falle einer Warnausgabe verjüngt sich das angezeigte Bild des Spellermenüs innerhalb 150 ms auf ca. 30 % der Ausgangsgröße (siehe Abb. 4.3 oben). Zeitgleich bewegt sich die gesamte Darstellung mit einer konstanten Beschleunigung in Richtung Fahrbahn. Um den Blick möglichst an die Animation zu binden, wird der alphanummerische Kreis des Spellermenüs mit einem roten Punkt überlagert (Anfangsradius = 3 cm). Nachdem die Darstellung aus dem CID „geflogen“ ist, bleibt das Display für drei Sekunden schwarz, anschließend erscheint das ursprüngliche Bild des Spellermenüs.

#### Warnkoordinator:

Der Warnkoordinator steuert die zeitliche Abfolge aller Warnausgaben. Hierfür ist ein Zustandsautomat in der Co-Simulation implementiert (siehe Kap. 4.2.1), der als Eingangsgrößen den Status der Auffahrwarnung (z. B. keine Warnung, Vorwarnung, usw.), die aktuelle Blickrichtung des Fahrers ( $CID\_Blick = true$ ,  $CID\_Blick = false$ ) und die vom Versuchsleiter ausgewählte Warnvariante erhält. Auf der Ausgangsseite gibt es für jede Anzeigekomponente der hier beschriebenen Warnkonzepte ein eigenes Steuersignal, mit dem z. B. die Animation oder einzelne LEDs ein- und ausgeschaltet werden können (z. B. starte Animation im CID, warte 150 ms, starte erste LED, warte 40 ms, starte zweite LED, usw.). Die zeitliche Koordination der Ausgaben erfolgt in der Co-Simulation mit einer Frequenz von 50 Hz. In der hier beschriebenen Fahrsimulatorstudie wird eine Blickabwendung ins CID vom Versuchsleiter per Tastendruck „markiert“. Mit dem verwendeten Blickerfassungssystem Dikablis war es zum Zeitpunkt der Studie technisch noch nicht möglich, den Status der aktuellen Blickrichtung in Echtzeit an die Co-Simulation zu senden.

### 5.3.2 Operationalisierung

Im Folgenden werden die Messgrößen (abhängige Variablen) zur Analyse des Blick- und Fahrverhaltens und der subjektiven Bewertung vorgestellt.

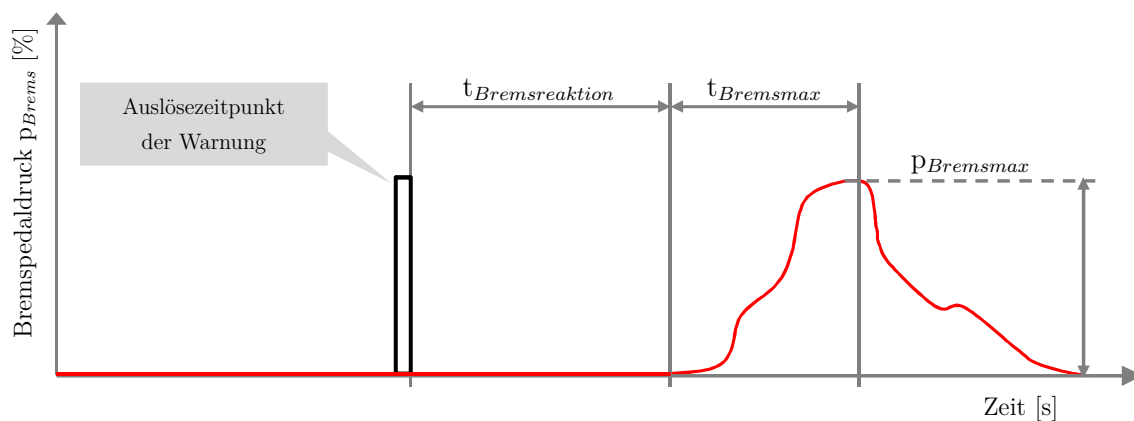
#### Blickverhalten:

Wie in Kapitel 4 wird auch hier das Blickverhalten mit dem Head-mounted Eyetracker Di-

kablis mit 25 FPS aufgezeichnet. Das Blickverhalten wird mit Hilfe der Blickreaktionszeit  $t_{Blickreaktion}$  [s], der Blickzuwendungszeit  $t_{Blickzuwendung}$  [s] und der Blickstrategie bewertet. Bei der Blickreaktionszeit handelt es sich um den Zeitraum vom Beginn der Warnausgabe bis der Blick das AOI CID verlässt (siehe Abb. 4.3 oben). Sie beschreibt somit, wie lange es dauert, die visuelle Aufmerksamkeit des Fahrers durch die Warnausgabe von der Nebenaufgabe zu lösen. Die Eintritts- und Austrittszeitpunkte der Blickrichtung in das AOI CID werden mit der Auswertesoftware D-Lab der Firma Ergoneers mittels automatischer Blickzuwendungserkennung bestimmt. Hieraus wird die Blickreaktionszeit berechnet. Bei der Blickzuwendungszeit handelt es sich um die Dauer vom Zeitpunkt der Warnausgabe bis der Fahrer auf das Vorderfahrzeug blickt. Hierfür werden die aufgezeichneten Blickdaten in D-Lab mittels visueller Inspektion „Frame für Frame“ analysiert. Eine automatische Blickzuwendungserkennung ist hier nicht möglich, da das Vorderfahrzeug durch seine Eigenbewegung keine fixe Position im Blickfeld hat. Auch die Blickstrategie wird mittels visueller Inspektion ausgewertet. Bei der Blickstrategie handelt es sich um die Blickwege, die sich durch die Warnausgaben vom CID bis zum Vorderfahrzeug ergeben. Es wird zum Beispiel gezählt, wie viele Fahrer vom CID direkt auf das Vorderfahrzeug blicken oder wie viele zuerst auf das Kombiinstrument und dann auf das Vorderfahrzeug blicken.

**Fahrverhalten:**

Alle Fahrdaten werden mit einer Frequenz von 100 Hz aufgezeichnet. Das Fahrverhalten wird u. a. anhand der Bremsreaktionszeit  $t_{Bremsreaktion}$  [s] bewertet – also der Dauer von der Warnausgabe bis zur Berührung des Bremspedals. Die Stärke der Bremspedalbetätigung wird über den maximalen Bremsdruck  $p_{Bremsmax}$  [%] bestimmt. Die Dauer der Bremspedalbetätigung wird über die Variable Bremszeit  $t_{Bremsmax}$  [s] beschrieben. Diese ist die Dauer von der ersten Bremspedalberührung bis zum Erreichen des maximalen Bremsdrucks (siehe Abb. 5.4).



**Abbildung 5.4:** Schematische Darstellung der abhängigen Variablen bezüglich des Bremspedaldrucks  $p_{Brems}$

Darüber hinaus wird die Umsetzzeit  $t_{Umsetz}$  [s] gemessen, d. h. die Dauer vom Zeitpunkt, an dem der Fahrer den Fuß vom Gaspedal nimmt bis zur ersten Berührung des Bremspedals.

In Tabelle 5.1 sind noch einmal die Variablen zusammengefasst, die eine Reaktionszeit im Blick- und Fahrverhalten beschreiben.



Variable	Beginn	Ende
$t_{Blickreaktion}$	Warnausgabe	Blick verlässt das AOI CID
$t_{Blickzuwendung}$	Warnausgabe	Blick auf Vorderfahrzeug
$t_{Bremsreaktion}$	Warnausgabe	$p_{Brems} > 0$
$t_{Bremsmax}$	Warnausgabe	$p_{Brems} = p_{Bremsmax}$
$t_{Umsetz}$	Gaspedalstellung erreicht $\gamma = 0$	$p_{Brems} > 0$

**Tabelle 5.1:** Erhobene Reaktionszeiten im Blick- und Fahrverhalten

### Subjektive Bewertung:

Zur subjektiven Bewertung werden die Fahrer unmittelbar nach einer Warnausgabe gefragt, was ihnen aufgefallen ist.

### 5.3.3 Versuchsdesign

Die Probanden fahren im statischen Fahrsimulator auf einer Autobahn mit drei Fahrstreifen, je nach Streckenabschnitt auf Anweisung des Versuchsleiters entweder 60 oder 80 km/h. Zusätzlich werden die Teilnehmer instruiert, auf welchem der drei Fahrstreifen sie fahren sollen. Zuerst machen sich die Fahrer während einer zehn-minütigen Eingewöhnungsfahrt mit der Fahrzeugführung im Simulator und der Bedienung der Nebenaufgabe vertraut. Die Fahrer müssen, wie in der Studie aus Kapitel 4, deutsche Städte buchstabenweise im sogenannten Spellermenü des Navigationssystems eingeben. Bei der eigentlichen Versuchsfahrt geben die Probanden auf Anweisung des Versuchsleiters alle zwei Minuten eine entsprechende Stadt ins Navigationssystem ein. Insgesamt erhalten die Probanden sechs Eingabeaufforderungen während einer Fahrt. Bei der dritten und fünften Eingabe erfolgt die sogenannte Prüfsituation, bei der es zu einer kritischen Auffahrsituation kommt. Bei beiden Prüfsituationen erleben die Probanden eine der vier Warnkonzepte (Unabhängige Variable = Warnvariante, Between-Subjects Design). Zur Untersuchung von Lerneffekten – also wie sich z. B. das Fahrverhalten bei einer wiederholten Darbietung einer Warnausgabe verhält –, erhalten die Fahrer in beiden Prüfsituationen die gleiche Warnvariante.

#### Ablauf der Prüfsituation:

Die Prüfsituation orientiert sich an einem sogenannten „Near-Crash“ Design [118]. Demnach ist die Situation so ausgelegt, dass ohne unmittelbare Fahrerreaktion eine Kollision entsteht, der aufmerksame oder gewarnte Fahrer jedoch genügend Zeitbudget hat, die Situation zu interpretieren, zu entscheiden und entsprechend zu handeln. Da viele Fahrer bei niedrigen Geschwindigkeiten dazu tendieren, sich mit Nebenaufgaben zu beschäftigen [118], fahren die Probanden die Prüfsituation mit 60 km/h. Ein vorausfahrendes Fahrzeug – das Zielfahrzeug – regelt daraufhin seine Geschwindigkeit automatisch so, dass die Zeitlücke zwischen Egofahrzeug – dem Probanden – und Zielfahrzeug ca. 1,6 s (ca. 26,6 m siehe Abb. 5.5) beträgt. Der Versuchsleiter fordert den Fahrer auf, eine Stadt im Navigationssystem einzugeben und beobachtet im Versuchsleiterraum online die aktuelle Blickrichtung des Fahrers. Der Name der Zielstadt ist so gewählt, dass deren Eingabe mindestens 10 Sekunden in Anspruch nimmt (Prüfsituation 1: Karlsruhe, Prüfsituation 2:

Potsdam). Sobald der Fahrer ins CID blickt, löst der Versuchsleiter per Knopfdruck eine Notbremsung des Zielfahrzeugs aus ( $a_{ZielFzg} = -6,5 \text{ m/s}^2$ ) und somit die entsprechende Warnvariante. Alle Warnausgaben werden schließlich im Vorwarnbereich bei einer TTC von ca. 2,8 Sekunden ausgelöst. Das Streckendesign in der Prüfsituation ist so konzipiert, dass der Fahrer zur Unfallvermeidung nur bremsen kann. Ein Ausweichen ist wegen einer seitlichen Fahrbahnbegrenzung (z. B. Leitplanke) oder eines Fahrzeugs auf dem linken oder rechten Fahrstreifen nicht möglich.



**Abbildung 5.5:** Egofahrzeug und Zielfahrzeug in der Prüfsituation (links), Proband mit dem Eyetracker Dikablis (rechts)

### 5.3.4 Stichprobe und Ausschlusskriterien

Insgesamt 109 Fahrer umfasst das Probandenkollektiv der Fahr Simulatorstudie. Zwei Kriterien müssen erfüllt sein, damit eine Prüfsituation in die Auswertung mit aufgenommen wird:

1. Die Prüfsituation läuft nach dem oben beschriebenen Muster ab, d. h. die Geschwindigkeit des Egofahrzeugs liegt zwischen 50 und 70 km/h, und die Zeitlücke zum Zielfahrzeug ist kleiner als 1,7 Sekunden (ca. 28,3 m Abstand)
2. Die Warnausgabe erfolgt während einer Blickabwendung ins CID

In der ersten Prüfsituation erfüllen acht Probanden das erste Kriterium nicht aufgrund einer zu defensiven Fahrweise. In der zweiten Prüfsituation sind es fünf Fahrer. Die zweite Bedingung wird von 20 Probanden in der ersten und von 44 Fahrern in der zweiten Prüfsituation nicht erfüllt. Das Verfehlen der zweiten Bedingung lässt sich jedoch häufig auf die manuelle Auslösung der Warnung durch den Versuchsleiter zurückführen. Die Warnung wird ausgelöst, während die Fahrer entweder bereits auf die Straße blicken oder ihren Blick zeitgleich mit der Warnausgabe in Richtung der Fahrbahn bewegen. Dies ist keine Reaktion auf den optischen Reiz, sondern eine intern motivierte Aufmerksamkeitssteuerung (top-down Prozess), die hier kein Untersuchungsgegenstand ist. Demnach gilt die zweite Bedingung erst als erfüllt, wenn eine Blickbewegung 150 ms nach der Warnausgabe erfolgt (vgl. Blicklatenzzeit bei bottom-up Prozessen aus Kap. 2.3.1). Drei Fahrer müssen den Versuch wegen Übelkeit vor der ersten Prüfsituation abbrechen.

Schließlich werden  $N = 79$  Probanden für die Analyse der ersten Prüfsituation berücksichtigt, darunter sind 19 Frauen und 59 Männer im Alter von 19 bis 57 Jahren ( $M = 32,9$  Jahre;  $SD = 9,6$  Jahre). Diese Stichprobe besteht aus vier Versuchsgruppen, die jeweils eine der vier Warnvarianten in den Prüfsituationen erhalten. Mögliche Störvariablen wie Geschlecht, Alter und iDrive-Erfahrung sind über alle Gruppen hinweg gleich. So besteht jede Versuchsgruppe zu ca. 40 % aus Fahrern einer jüngeren (19 - 24 Jahre), zu ca. 40 % aus Fahrern einer mittleren (25 - 49 Jahre) und zu ca. 20 % aus Fahrern einer älteren Altersgruppe (50 - 57 Jahre). Der Frauenanteil pro Gruppe liegt bei ca. 20 % und knapp die Hälfte der Probanden einer Gruppe hat iDrive Erfahrung. Die meisten Teilnehmer geben eine jährliche Fahrleistung zwischen 10.000 und 20.000 km an (gemittelt über alle 4 Gruppen:  $M = 42,75$  %;  $SD = 21,3$  %). Die zweite Prüfsituation dient ausschließlich der Analyse möglicher Lerneffekte, d. h. inwieweit sich das Verhalten bei der wiederholten Darbietung einer Warnvariante verändert. Zur Analyse der Lerneffekte werden ausschließlich Probanden berücksichtigt, die die hier beschriebenen Kriterien sowohl in der ersten als auch in der zweiten Prüfsituation erfüllen. Da in der zweiten Prüfsituation beinahe die Hälfte der Fahrer ( $N = 52$ ) das erste Kriterium nicht erfüllt, werden zur Analyse der Lerneffekte lediglich  $N = 48$  Teilnehmer verwendet.

### 5.3.5 Ergebnisse

Die statistische Auswertung erfolgt unter Verwendung der Statistik-Software SPSS der Firma IBM. Sofern die gemessenen Daten die Voraussetzung für parametrische Analyseverfahren nicht erfüllen, werden entsprechende nicht-parametrische Tests verwendet. Das Signifikanzniveau liegt in dieser Arbeit bei 5 %. Bei paarweisen Vergleichen mit der *Baseline* wird – mit Verweis auf die Argumentation von Keppel [86] – auf die Alpha-Kumulierung verzichtet. Demnach kann einer geringen Anzahl von theoretisch fundierten Vergleichen gegenüber einer Kontrollbedingung ein besonderer Status eingeräumt werden, da eine zu große Besorgnis um den Fehler 1. Art vielversprechende neue Phänomene unentdeckt bleiben lässt. Alle hier verwendeten Methoden sind in der entsprechenden Grundlagenliteratur zu finden (z. B. [17] [96] [131] [75]). Sofern nicht anders angegeben, beziehen sich alle Ergebnisse auf die erste Prüfsituation.

#### **Blickverhalten:**

Ein signifikanter Unterschied zwischen den Mittelwerten der Blickreaktionszeit  $t_{\text{Blickreaktion}}$  kann mit Hilfe des Kruskal-Wallis Tests nachgewiesen werden ( $H(3) = 9,996$ ,  $p = ,02$ ). Sowohl die *HUD*- ( $M = 0,41$  s ;  $SD = 0,12$  s) als auch die *LED*-Variante ( $M = 0,47$  s ;  $SD = 0,18$  s) verursachen mit ca. 0,4 s die schnellste Blickreaktionszeit (siehe Abb. 5.6). Fast doppelt so lange benötigen die Fahrer bei der Variante *CID* ( $M = 0,83$  s ;  $SD = 0,52$  s), um ihren Blick aus dem Display zu lösen. Im Vergleich dazu liegen die Blickreaktionszeiten der *Baseline* im Schnitt bei 0,68 Sekunden ( $SD = 0,39$  s). Die Überprüfung der Hypothesen 1a, 1b und 1c erfolgt mit Hilfe von Mann-Whitney U-Tests. So zeigt sich, dass die Blickreaktionszeiten von Variante *HUD* ( $U = 139$ ,  $p = ,008$ ; 1-seitig) und Variante *LED* ( $U = 162$ ,  $p = ,025$ ; 1-seitig) um ca. 0,2 s signifikant kürzer als die der *Baseline* sind. Die Blickreaktionszeiten der Variante *CID* liegen ca. 0,15 s über denen der *Baseline*, erreichen

jedoch nicht das Signifikanzniveau. Somit lässt sich zusammenfassen, dass die Hypothesen 1a und 1b statistisch bestätigt werden können, Hypothese 1c jedoch nicht.

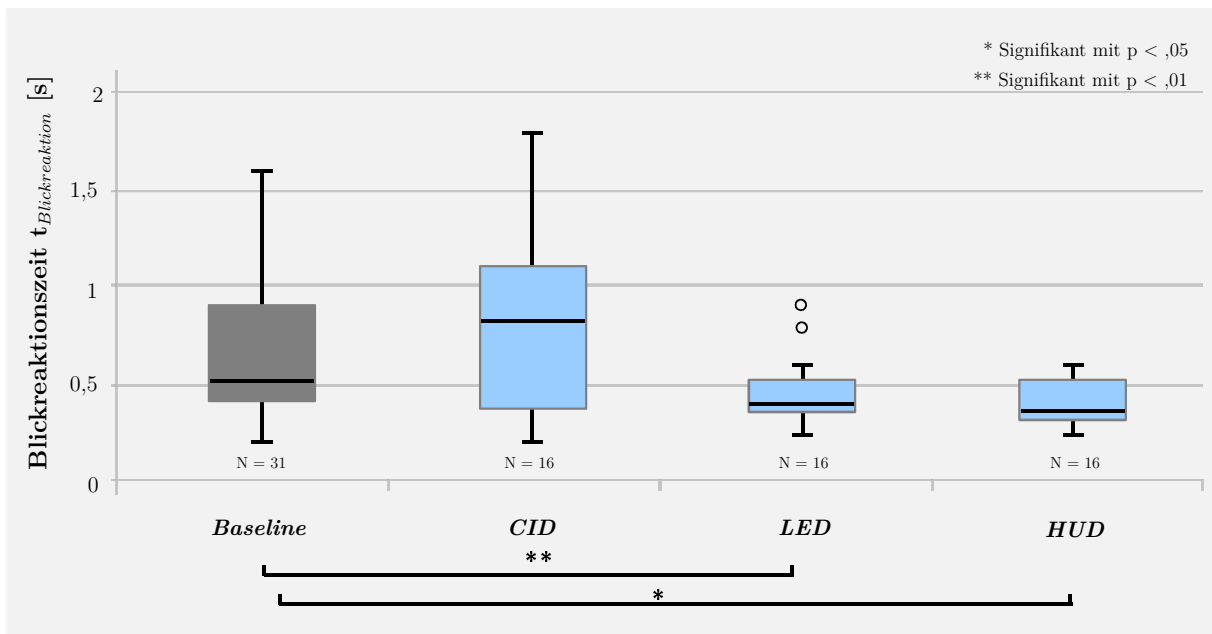


Abbildung 5.6: Boxplots der Blickreaktionszeiten in der ersten Prüfsituation

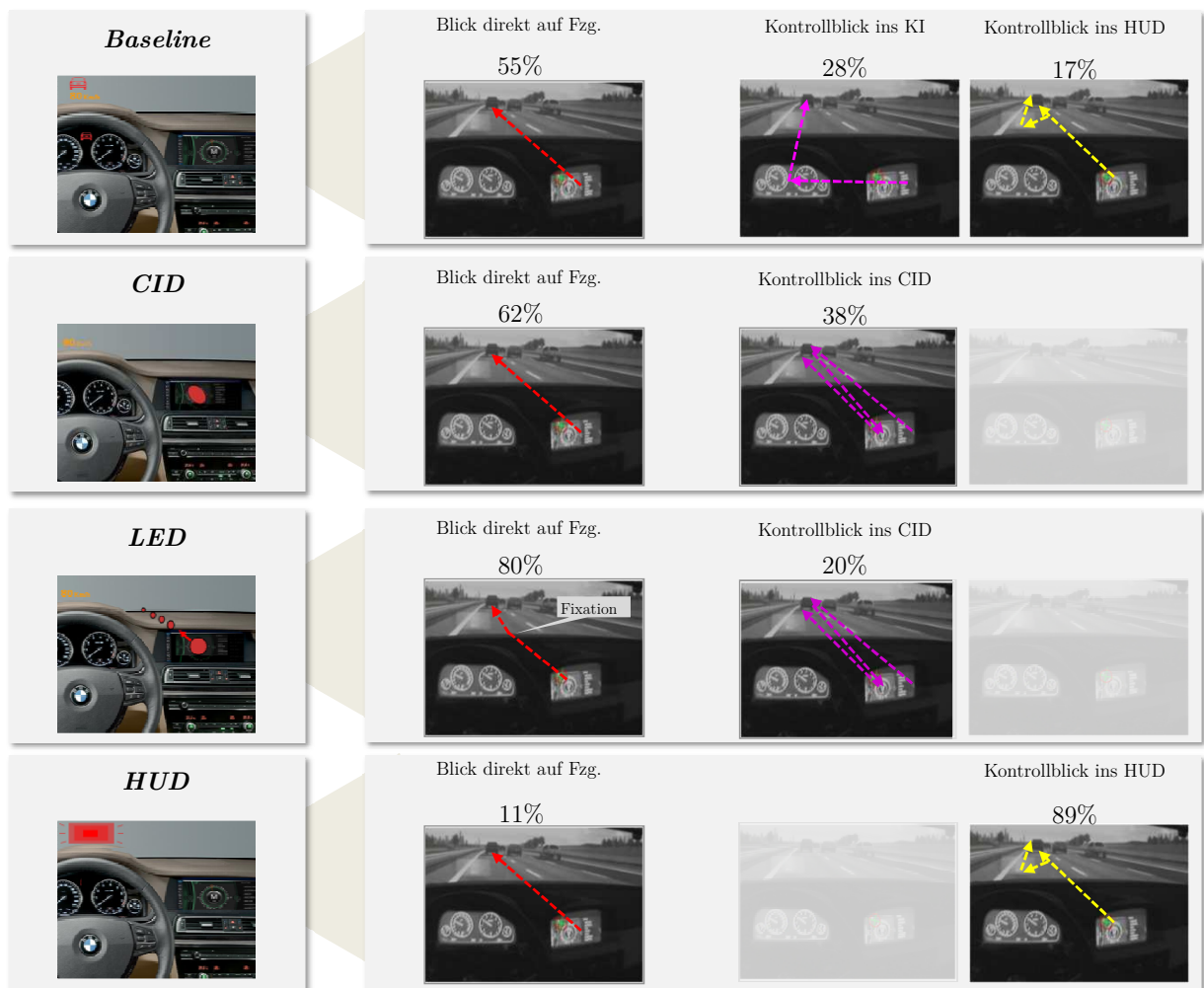
Vergleich der $t_{\text{Blickreaktion}}$	Zeitunterschied $\Delta t$ [s]	Signifikanz (einseitig)
<i>CID</i> zu <i>Baseline</i>	+ 0,15	U = 210, p = ,195
<i>LED</i> zu <i>Baseline</i>	- 0,21	U = 162, p = ,025*
<i>HUD</i> zu <i>Baseline</i>	- 0,27	U = 139, p = ,008*

Tabelle 5.2: Paarweiser Vergleich der Blickreaktionszeiten zwischen den Varianten und der *Baseline*, ein Reaktionszeitunterschied  $< 0$  bedeutet eine Verkürzung bzw.  $> 0$  eine Verlängerung der Reaktionszeit gegenüber der *Baseline*

Die Analyse der Blickzuwendungszeit  $t_{\text{Blickzuwendung}}$  ergibt keinen signifikanten Unterschied zwischen den Mittelwerten ( $F[3,75] = 0,684$ ,  $p = ,56$ ). Tendenziell blicken die Fahrer sowohl bei der *HUD*- ( $M = 0,83$  s ;  $SD = 0,35$  s) als auch bei der *LED*-Variante ( $M = 0,88$  s ;  $SD = 0,34$  s) schneller auf das Zielfahrzeug als bei der *Baseline* ( $M = 0,92$  s ;  $SD = 0,37$  s). Im Vergleich dazu liegen die Blickzuwendungszeiten der *CID*-Variante im Schnitt bei 1,02 Sekunden ( $SD = 0,50$  s).

Wie in Abbildung 5.7 gezeigt wird, verlaufen die Blickwege bei 28 % der Fahrer der *Baseline*-Gruppe über das Kombiinstrument zum Zielfahrzeug. 18 % machen einen kurzen Kontrollblick auf die Anzeige im HUD und 54 % blicken direkt vom CID auf das Zielfahrzeug. Bei der Variante *LED* folgen die Blicke aller Probanden dem Laufflicht bis zur Scheibenwurzel, wonach 80 % der Fahrer anschließend direkt auf das Zielfahrzeug blicken und 20 % einen kurzen Kontrollblick zurück auf das CID werfen. Unabhängig davon wird der Blick aller Probanden in einer glatten Augenbewegung (smooth pursuit) bis zur Scheibenwurzel geführt, wo der Blick im Schnitt 177 ms ( $SD = 63$  ms) verweilt und anschließend

in einer Sakkade auf das Zielfahrzeug oder zurück ins CID wechselt. Bei der Variante *CID* blicken dagegen 62 % der Fahrer in einer Sakkade direkt auf das Zielfahrzeug, wogegen 38 % kurz zur Kontrolle zurück auf das CID blicken. Der Blick folgt hierbei nicht der Animation, sondern verweilt bis zur ersten Sakkade innerhalb des CIDs. Variante *HUD* bewirkt bei 11 % der Fahrer einen Blickwechsel vom CID direkt auf das Zielfahrzeug. Alle übrigen Probanden der *HUD*-Variante schauen mindestens einmal kurz zur Kontrolle in das aufflackernde HUD.



**Abbildung 5.7:** Vergleich der Blickwege in der ersten Prüfsituation (ausgegraute Felder sind Blickwege, die bei der entsprechenden Variante nicht vorkommen)

#### Fahrverhalten:

Mittels einfaktorieller Varianzanalyse kann gezeigt werden, dass sich die Mittelwerte der Bremsreaktionszeiten  $t_{Bremsreaktion}$  signifikant unterscheiden ( $F[3,75] = 4,50$ ,  $p = ,006$ ). Wie in Abbildung 5.8 zu sehen ist, reagieren die Fahrer bei der Variante *HUD* mit einer mittleren Bremsreaktionszeit von 1,59 Sekunden ( $SD = 0,24$  s) am schnellsten. Etwas später bremsen die Fahrer bei der Variante *LED* ( $M = 1,66$  s ;  $SD = 0,15$  s), wogegen die Variante *CID* ( $M = 1,89$  s ;  $SD = 0,25$  s) die langsamste Bremsreaktion verursacht. Ein Vergleich mit der *Baseline* ( $M = 1,75$  s ;  $SD = 0,27$  s) zeigt, dass die Variante *CID* zu

langsameren bzw. die Varianten *LED* und *HUD* zu schnelleren Bremsreaktionszeiten führen. Um dies statistisch zu prüfen, wird jede Variante mittels eines einseitigen t-Tests mit der *Baseline* verglichen. So unterscheiden sich Variante *CID* mit  $p = ,044$  und Variante *HUD* mit  $p = ,032$  signifikant von der *Baseline* (siehe Tab. 5.3). Die Unterschiede zwischen der *Baseline* und der *LED*-Variante sind jedoch nicht signifikant. Dennoch sind bei Betrachtung der Mittelwerte tendenziell kürzere Reaktionszeiten bei der *LED*-Variante zu erkennen. Somit können die Hypothesen 2a und 2c statistisch bestätigt werden, Hypothese 2b jedoch nicht.

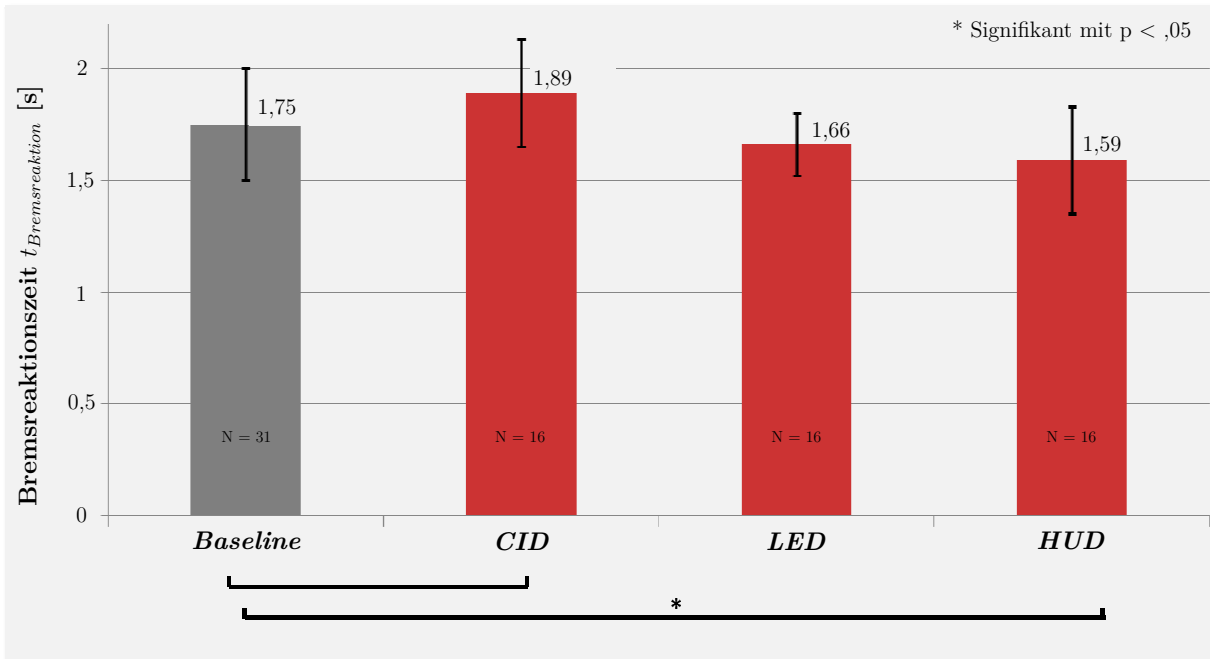


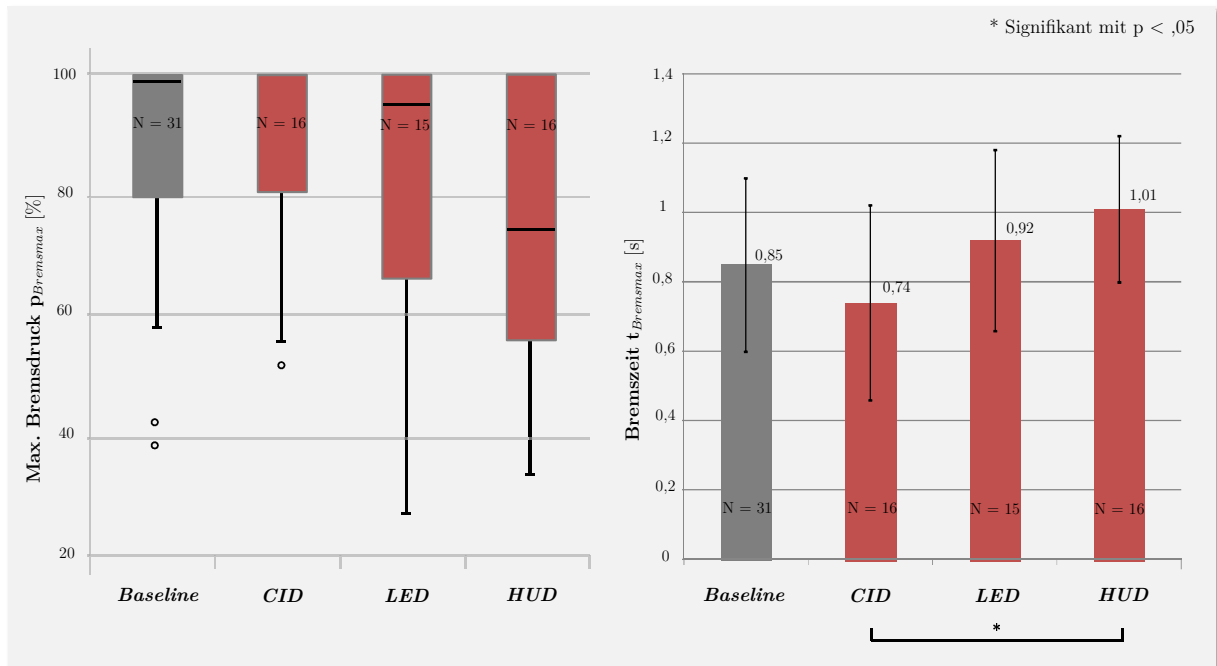
Abbildung 5.8: Mittelwerte der Bremsreaktionszeiten in der ersten Prüfsituation

Vergleich der $t_{Bremsreaktion}$	Zeitunterschied $\Delta t$ [s]	Signifikanz (einseitig)
<i>Baseline</i> zu <i>CID</i>	+ 0,14	$t(45) = -1,75, p = ,044^*$
<i>Baseline</i> zu <i>LED</i>	- 0,09	$t(45) = 1,11, p = ,137$
<i>Baseline</i> zu <i>HUD</i>	- 0,16	$t(45) = 1,90, p = ,032^*$

Tabelle 5.3: Paarweiser Vergleich der Bremsreaktionszeiten zwischen den Varianten und der *Baseline*, ein Reaktionszeitunterschied  $< 0$  bedeutet eine Verkürzung bzw.  $> 0$  eine Verlängerung der Reaktionszeit gegenüber der *Baseline*

Ein signifikanter Unterschied zwischen den Mittelwerten des maximalen Bremsdrucks  $p_{Bremsmax}$  kann nicht nachgewiesen werden (Kruskal-Wallis  $H(3) = 4,354, p = ,225$ ). Tendenziell bremsen die Fahrer bei der *LED*- ( $M = 0,80\%$  ;  $SD = 0,26\%$ ) und *HUD*-Variante ( $M = 0,75\%$  ;  $SD = 0,23\%$ ) schwächer als bei der *Baseline* ( $M = 0,87\%$  ;  $SD = 0,18\%$ ) und *CID*-Variante ( $M = 0,89\%$  ;  $SD = 0,18\%$ ). Dies kann jedoch nicht statistisch belegt werden und bestätigt somit Hypothese 2d und 2e nicht. Die Analyse der Bremszeit  $t_{Bremsmax}$  ergibt dagegen einen signifikanten Unterschied zwischen den Mittelwerten

( $F[3,74] = 3,356$ ,  $p = ,023$ ). So erreichen die Fahrer bei Variante *HUD* ( $M = 1,01$  s ;  $SD = 0,21$  s) ca. 300 ms später den maximalen Bremsdruck als bei Variante *CID* ( $M = 0,74$  s ;  $SD = 0,28$  s). Ein Post-hoc Test zeigt, dass dieser Unterschied signifikant ist ( $p = ,024$  ; nach Games-Howell). Weder ein Vergleich mit der *Baseline* noch mit der Variante *LED* ergibt weitere signifikante Unterschiede. Somit kann nur die Hypothese 2g (bezogen auf den Vergleich zwischen der *CID*- und *HUD*-Variante) statistisch nachgewiesen werden. Tendenziell können auch längere Bremszeiten bei der *CID*- und *HUD*-Variante als bei der *Baseline* und *CID*-Variante festgestellt werden (siehe Abb. 5.9).

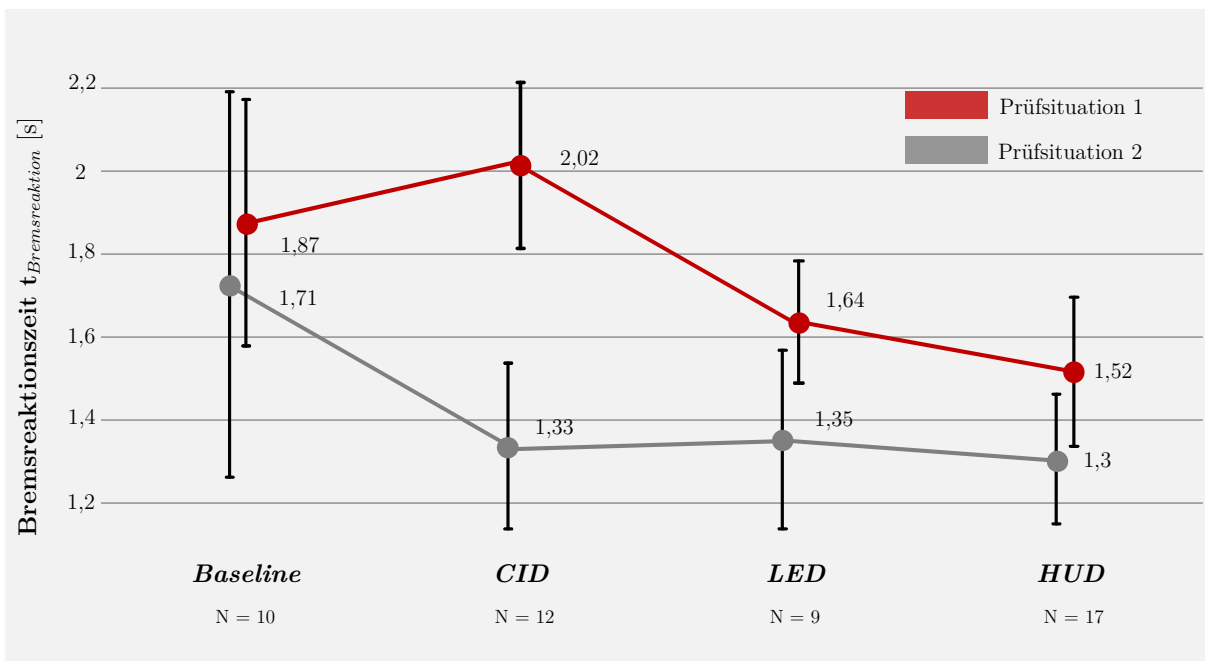


**Abbildung 5.9:** Boxplots der maximalen Bremsdrücke (links) und Mittelwerte der Bremszeiten (rechts), jeweils in der ersten Prüfsituation

Die Analyse der Umsetzzeit  $t_{Umsetz}$  ergibt einen signifikanten Unterschied der Mittelwerte (Kruskal-Wallis Test:  $H(3) = 9,616$ ,  $p = ,02$ ). Nur 75 % der Stichprobe der ersten Prüfsituation können in diese Analyse mit einbezogen werden, da nicht alle Fahrer während der Warnausgabe das Gaspedal mit ihrem Fuß berühren. Die *LED*-Variante verursacht mit durchschnittlich 0,37 Sekunden ( $SD = 0,13$  s ; bei  $N = 11$ ) die schnellste Umsetzzeit. Im Vergleich dazu liegen die mittleren Umsetzzeiten der *Baseline* ( $M = 0,55$  s ;  $SD = 0,34$  s ; bei  $N = 26$ ), *CID*- ( $M = 0,68$  s ;  $SD = 0,37$  s ; bei  $N = 12$ ) und *HUD*-Variante ( $M = 0,68$  s ;  $SD = 0,31$  s ; bei  $N = 10$ ) bei ca. 0,6 Sekunden. Zur weiteren Untersuchung werden die Mittelwerte mit Hilfe von Mann-Whitney Tests verglichen. Unter Verwendung einer Bonferroni-Korrektur mit einem Signifikanzniveau von 0,017 zeigt sich, dass die Umsetzzeit bei der *LED*-Variante signifikant kürzer als bei der *HUD*-Variante ist ( $U = 15,5$ ,  $p = ,004$ ; 2-seitig). Der Unterschied zwischen der *CID*-Variante und der *LED*-Variante ist knapp signifikant ( $U = 27,5$ ,  $p = ,017$ ; 2-seitig).

Der Lerneffekt wird anhand der Bremsreaktionszeit-Unterschiede  $t_{Bremsreaktion}$  zwischen der ersten und zweiten Prüfsituation analysiert. Eine zweifaktorielle Varianzanalyse ergibt

einen signifikanten Unterschied in Bezug auf den Zwischensubjektfaktor ( $\hat{=}$  Warnvariante,  $F[3,44] = 7,255$  ;  $p < ,001$ ). Entscheidend für die Bewertung des Lerneffektes ist jedoch der Innersubjektfaktor ( $\hat{=}$  Nummer der Prüfsituation). Hier zeigt die Analyse einen signifikanten Haupteffekt zwischen der ersten und zweiten Prüfsituation ( $F[1,44] = 59,901$  ;  $p < ,001$ ). Die Fahrer benötigen demnach in der ersten Prüfsituation – über alle Varianten gemittelt – eine längere Bremsreaktionszeit ( $M = 1,76$  s ;  $SD = 0,22$  s) als in der zweiten Prüfsituation ( $M = 1,43$  s ;  $SD = 0,32$  s). Außerdem liegt eine signifikante Interaktion zwischen der Warnvariante und dem Messzeitpunkt ( $F[3,44] = 7,385$  ;  $p < ,001$ ) vor. Dies lässt sich auf den besonders großen Lerneffekt bei Variante *CID* zurückführen (im Vergleich zu Variante *LED* und *HUD*, siehe Abb. 5.10). Mit Ausnahme der *Baseline* liegen in der zweiten Prüfsituation die Bremsreaktionszeiten bei allen Varianten im Durchschnitt bei 1,33 Sekunden ( $SD = 0,02$  s). Bei der *CID*-, *HUD*- und *LED*-Variante kann somit von einem Lerneffekt bezüglich der wiederholten Darbietung der Warnausgabe gesprochen werden.



**Abbildung 5.10:** Mittelwerte der Bremsreaktionszeiten in der ersten und zweiten Prüfsituation

**Subjektive Bewertung:**

Unmittelbar nach der Prüfsituation geben 45 % der Probanden, die die *Baseline* erlebt haben, an, sie hätten keine Warnung gesehen („das Vorderfahrzeug hat gebremst“). Bei der Variante *CID* verstehen 69 % die Warnung nicht als solche und antworten z. B. „Das Navi ist abgestürzt“. Im Gegensatz dazu verstehen alle Fahrer die *LED*-Variante als Hinweisreiz und geben zu 87 % an „Ein roter Strich lenkt meinen Blick auf die Straße“, obwohl sie dies meist nicht mit den verbauten LEDs in Verbindung bringen. Alle Probanden der *HUD*-Variante verstehen diese auch als „Abstandswarnung“.



## 5.4 Zusammenfassung und Diskussion

Die starke Verkürzung der Reaktionszeiten der Varianten *LED* und *HUD* gegenüber der *Baseline* zeigt, dass eine fahrerabhängige Warnstrategie – also die Anpassung von Warnausgaben an die Blickrichtung – großes Potential hat. Der Blick wird bei beiden Varianten schnell auf die Straße gelenkt, wodurch die Fahrer früher bremsen.

Bei der *Baseline* kann davon ausgegangen werden, dass die Fahrer die Warnung häufig nicht sehen, weshalb der Blick nicht wegen der Warnausgabe, sondern intern motiviert oder durch die Bremsleuchten des Zielfahrzeugs zurück auf die Fahrbahn wechselt. Diese Annahme deckt sich sowohl mit den langen Blickreaktionszeiten als auch mit häufigen Aussagen der Fahrer, keine Warnausgabe bemerkt zu haben. Darüber hinaus zeigt der Vergleich der Bremsreaktionszeiten in der ersten und zweiten Prüfsituation, dass nur bei der *Baseline* keine Reaktionszeitverbesserung festgestellt werden kann. Alle fahrerabhängigen Warnstrategien verursachen in der zweiten Prüfsituation deutlich kürzere Bremsreaktionszeiten. Dies zeigt, dass selbst vorbereitete Fahrer die Kombi- und HUD-Ausgabe der *Baseline* bei Blickabwendung kaum wahrnehmen können. Die Fahrer blicken später zur Fahrbahn und bremsen daher schreckhaft. Dies spiegelt sich vor allem in den hohen maximalen Bremsdrücken und den kurzen Bremszeiten wider.

Im Gegensatz dazu hat die fahrerabhängige Warnstrategie „Animierte Blickführung“ einen positiven Effekt auf das Blick- und Fahrverhalten. Mittels der *LED*-Variante wird erstmals die Wirksamkeit einer Scheinbewegung durch eine stroboskopische Bewegungsanimation im Fahrkontext gezeigt. Der Blick folgt bei allen Probanden in einer fließenden Bewegung dem Laufflicht zeitlich versetzt hinterher und endet auf dem Zielfahrzeug. Aufgrund einer sehr kurzen Reizverarbeitungszeit ( $< 0,4$  s) kann davon ausgegangen werden, dass der Blick schnell und automatisch auf die Gefahr gerichtet wird. Dennoch stoppt die Blickbewegung für ca. 177 ms auf Höhe der Scheibenwurzel und setzt sich anschließend in einer Sakkade zur Fahrbahn fort. Nach DIN 15007 kann hier jedoch nicht von einem Blick gesprochen werden (da Fixationszeit  $< 200$  ms). Die Fixation lässt sich vielmehr dadurch begründen, dass zum einen die Reizintensität des Laufflichts – aufgrund der höheren Entfernung – im Bereich der Scheibenwurzel abnimmt und zum anderen die Animation dort endet. Da im Fahrsimulator die Bremslichter des Zielfahrzeugs keine eigene Leuchtquelle sind, ist anzunehmen, dass unter realen Bedingungen im Straßenverkehr – aufgrund der aktiv leuchtenden Bremslichter vorausfahrender Fahrzeuge und damit der stärkeren Reizintensität – die Fixation auf die Scheibenwurzel kürzer ist oder gar nicht erst entsteht.

Die *CID*-Variante hat einen negativen Effekt auf das Blick- und Fahrverhalten. Eine geführte Blickbewegung zur Straße, ausgelöst allein durch die Animation im CID, hat keine Wirksamkeit. Der Abstand zwischen CID und Scheibenwurzel reicht nicht aus, um eine schnelle Ausrichtung der Aufmerksamkeit zur Straße zu bewirken. So lässt die hohe Blickreaktionszeit auf eine längere Reizverarbeitung durch Interpretationsprozesse schließen. Diese These wird durch häufige Fehlinterpretationen („Navi ist abgestürzt“) gestützt. Auch die hohe Streuung der Mittelwerte der Blickreaktionszeit zeigt, dass die Animation individuell sehr unterschiedliche Reaktionen hervorruft. Ähnlich wie bei der *Baseline*

bremsten die Fahrer eher schreckhaft ab (hohe maximale Bremsdrücke und schnelle Pedalbetätigungen), da sie sehr spät auf die Situation aufmerksam werden. Obwohl die meisten Fahrer das LED-Laufflicht nicht bewusst wahrnehmen, kann dessen Nutzen aufgrund der großen Brems- und Blickreaktionszeitunterschiede zwischen Variante *CID* und *LED* nachgewiesen werden.

Die *HUD*-Variante ruft durch das Prinzip der „Peripheren Blickführung“ die schnellsten Blick- und Bremsreaktionszeiten hervor. Die Fahrer werden schneller auf die Situation aufmerksam, und leiten unmittelbar das Bremsmanöver ein, bremsen, jedoch wie auch bei Variante *LED*, eher gemäßigt. Die schnelle Aufmerksamkeitslenkung durch den peripheren Reiz ist zugleich ein Nachteil der Warnvariante. Die Reizintensität ist – aufgrund der Größe der Anzeigefläche – so hoch, dass viele Fahrer erst ins HUD blicken und dann auf das Zielfahrzeug. Dagegen wandert bei der *LED*-Variante der Blick automatisch bis zur Scheibenwurzel und wechselt anschließend in einer Sakkade direkt auf das Zielfahrzeug.

Außer bei der *Baseline*, kann bei allen fahrerabhängigen Warnstrategien ein Lerneffekt zwischen den beiden Prüfsituationen festgestellt werden. Grundsätzlich ist es jedoch fraglich, ob dieser Lerneffekt auch unter realen Bedingungen so hoch ausfällt. Da die Warnausgaben zeitlich so kurz hintereinander auftreten, kommt der Lerneffekt mit hoher Wahrscheinlichkeit aufgrund der Methodik zustande und nicht wegen der Warnkonzepte an sich. Würden, wie im realen Straßenverkehr, mehrere Tage oder Wochen zwischen zwei Warnausgaben liegen, so wäre vermutlich kein so hoher Lerneffekt zu erwarten.

Wie sich die hier vorgestellten Warnkonzepte im Informationsverarbeitungsprozess äußern, wird in Abbildung 5.11 gezeigt. Die ermittelten Reaktionszeiten sind hierfür auf den in Kapitel 2.2.2 vorgestellten OODA-Loop übertragen. Somit entspricht die Blickreaktionszeit  $t_{\text{Blickreaktion}}$  der Observe-Phase, die Umsetzzeit  $t_{\text{Umsetz}}$  der Act-Phase und die Bremsreaktionszeit  $t_{\text{Bremsreaktion}}$  der gesamten Dauer des OODA-Loops. Laut der Definition von Kates [85] ist in der Act-Phase auch eine Bremspedalbewegung enthalten. Die Dauer oder Stärke dieser Pedalbewegung ist jedoch nicht definiert, weshalb sie hier nicht berücksichtigt wird. Der Beginn der Orient & Decide-Phase ergibt sich aus der Dauer der Blickreaktionszeit, das Ende aus der Differenz der Bremsreaktionszeit und Umsetzzeit (Ende Orient & Decide-Phase =  $t_{\text{Bremsreaktion}} - t_{\text{Umsetz}}$ ).

Demnach führt eine kürzere Observe-Phase tendenziell zu schnelleren Bremsreaktionen. Die fahrerabhängigen Warnstrategien sind somit in dieser Phase am wirksamsten (außer die *CID*-Variante). Die *LED*-Variante hat zwar auch eine relativ kurze Observe-Phase, jedoch gibt es hier eine überdurchschnittlich lange Orient & Decide-Phase, die wiederum durch eine sehr kurze Act-Phase kompensiert wird. Dies lässt sich auf den fehlenden Warncharakter der Bewegungsanimation zurückführen. Durch die Animation wird der Blick zwar automatisch und unmittelbar auf das Zielfahrzeug gelenkt, sie ist jedoch nach 350 ms wieder verschwunden, so dass der Fahrer die Situation selbstständig interpretieren muss. Dies deckt sich auch mit den Aussagen der Fahrer unmittelbar nach der Warnausgabe. Im Gegensatz zur *HUD*-Variante, bei der die Ausgabe häufig mit einem „Abstandswarnsystem“ in Verbindung gebracht wird, verstehen die Fahrer die Animation als „... Blitz ...“ oder „... roter Strich...“. Obwohl die Fahrer bei der *LED*-Variante die kürzesten Umsetzzeiten

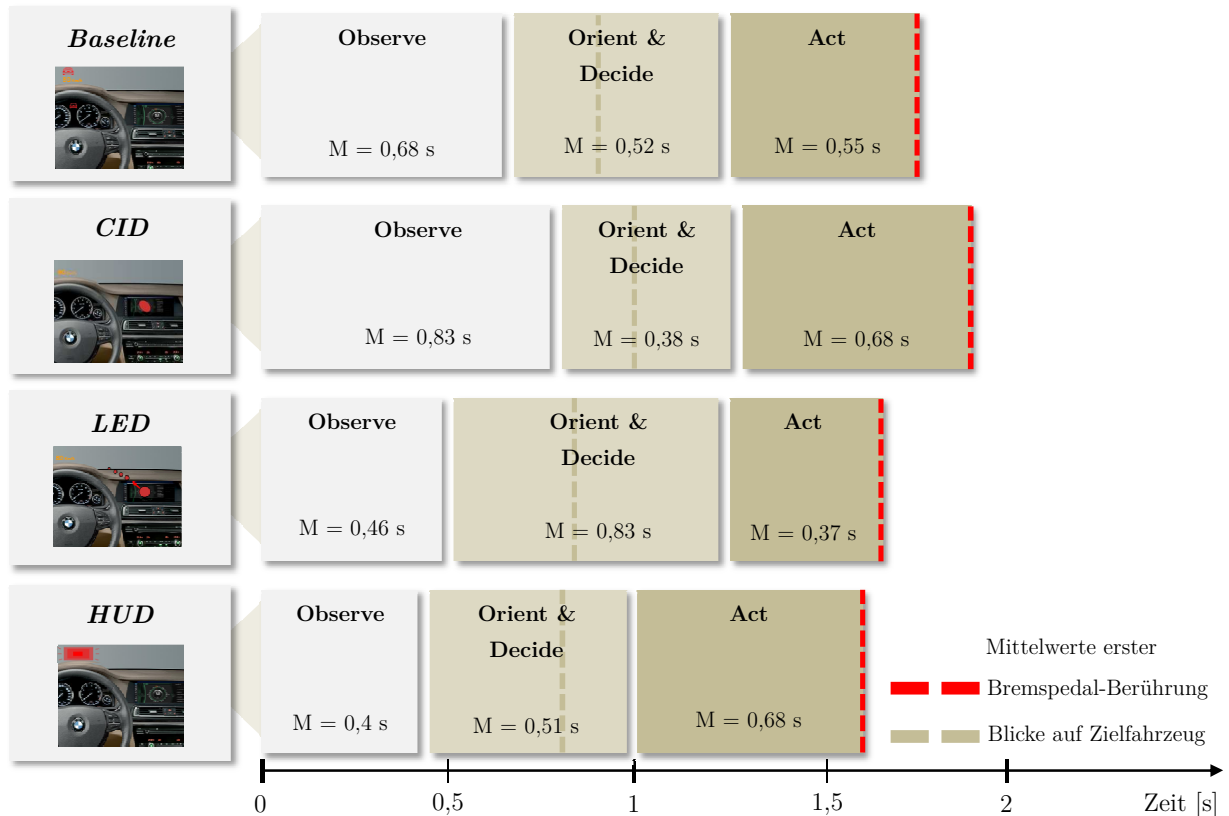


Abbildung 5.11: Effekte fahrerabhängiger Warnstrategien auf den OODA-Loop

haben, bremsen sie eher gemäßigt und nicht schreckhaft, da sie die Situation im Vergleich zur *Baseline* viel früher wahrnehmen und einschätzen können.

Abschließend lässt sich festhalten, dass bei Unaufmerksamkeit sowohl die Verstärkung eines peripheren Reizes als auch ein dynamisch bewegter Hinweisreiz eine höhere Wirksamkeit als herkömmliche Warngaben besitzen. Mit Hilfe rein konfliktunspezifischer Reize – also ohne semantischen Inhalt (z. B. Symbolik) – ist eine schnelle Ausrichtung der Aufmerksamkeit auf die Gefahr möglich. Die Forderung nach einer schnellen und automatisch ablaufenden visuellen Aufmerksamkeitssteuerung kann somit erfüllt werden. Die entscheidenden Gestaltungsaspekte sind hier eine höhere Reizintensität, Richtungsspezifität und Dynamik. Aus dem Ansatz der „Animierten Blickführung“ ergibt sich nun ein neuer Lösungsraum für fahrerabhängige Warnstrategien. Darin ist eine Vielzahl an Gestaltungsmöglichkeiten, wie die Animationsgeschwindigkeit, Animationsinhalt usw. enthalten. Zum Beispiel kann eine konfliktunspezifische Animation, wie ein animiertes Fußgängersymbol statt des roten Punktes, die Wirksamkeit weiter erhöhen. Aufgrund eines höheren Warncharakters kann hierdurch die Orient & Decide-Phase möglicherweise verkürzt werden. Schon eine Verkürzung der Reaktionszeit um 100 ms – wie sie hier nachgewiesen wird – hat einen bedeutend kleineren Anhalteweg zur Folge (z. B. bei 100 km/h ca. 2,7 m). Da bereits bei wenigen Metern die Verletzungsschwere abnimmt [123], kann dieser „kleine Unterschied“ im Notfall Leben retten.



---

# Entwicklung und Bewertung von Informationskonzepten für die Querführung

---

Nachdem im letzten Kapitel neuartige Warnkonzepte für Assistenzsysteme der Längsführung erarbeitet wurden, wird in diesem Kapitel ein Informationskonzept zur Unterstützung des Fahrers bei der Querführung entwickelt. Es wird somit der Frage aus Kapitel 3.5.2 nachgegangen:

*Wie muss die Informationsstufe einer Spurwechselwarnung gestaltet werden, damit sie jederzeit wahrnehmbar ist, der Fahrer ein verbessertes räumliches Situationsbewusstsein erhält, dabei jedoch nicht gestört oder abgelenkt wird?*

Das in diesem Kapitel vorgestellte Informationskonzept soll den Fahrer in der frühen Phase eines Fahrstreifenwechsels über Fahrzeuge im toten Winkel informieren, so dass es erst gar nicht zu einer kritischen Verkehrssituation kommt. Eine aufdringliche Akutwarnung wird in vielen Fällen somit überflüssig. Eine Verkehrssituation, in der der Fahrer die Absicht hat den Fahrstreifen zu wechseln, sich jedoch ein Fahrzeug auf dem benachbarten Fahrstreifen im toten Winkel befindet, wird im Folgenden als „Totwinkelsituation“ bezeichnet.

## 6.1 Handlungsphasen bei Fahrstreifenwechsel

Um ein Informationskonzept für Totwinkelsituationen entwickeln zu können, müssen zuerst die Handlungsabläufe und das entsprechende Unterstützungspotential bei einem Fahrstreifenwechsel verstanden werden. In der Literatur wird ein Fahrstreifenwechsel häufig in vier sequenziell ablaufende Abschnitte aufgeteilt (Annäherungs-, Orientierungs-, Handlungsphase und Wiedereinpendeln) [44] [128] [38]. Diese sind relativ allgemein gehalten und werden daher für Fahrstreifenwechsel in Totwinkelsituationen wie folgt angepasst:

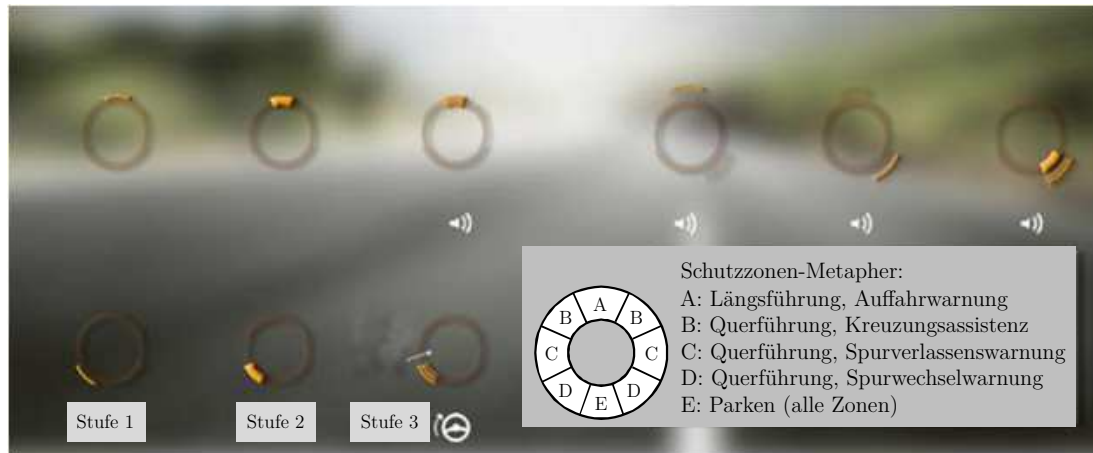
- **Annäherungsphase:** Ausgangspunkt eines Fahrstreifenwechsels ist die Beurteilung der vorausliegenden Verkehrssituation. Diese Phase beginnt mit einer Abschätzung von Abständen und Relativgeschwindigkeiten vorausfahrender Fahrzeuge. Hierbei wird die Notwendigkeit eines Fahrstreifenwechsels geprüft.
- **Orientierungs- und Vorbereitungsphase:** Diese Phase beginnt mit dem Wunsch des Fahrers, den Fahrstreifen zu wechseln. Hierbei entwickelt der Fahrer ein räumliches Situationsbewusstsein durch Absicherungsblicke zur Seite und nach hinten. Daraufhin bereitet der Fahrer den Fahrstreifenwechsel vor, indem er gegebenenfalls die Längsführung durch Beschleunigen oder Abbremsen so anpasst, dass es auf dem Zielfahrstreifen zu keiner Kollision mit anderen Verkehrsteilnehmern kommt (im Folgenden wird diese Phase vereinfacht als „Orientierungsphase“ bezeichnet).
- **Handlungsphase:** Diese Phase beginnt, sobald der Fahrer eine Änderung der Querstabilisierung einleitet, um auf den Zielfahrstreifen zu gelangen. Der Beginn der Handlungsphase kann bei einer Überschreitung bestimmter Schwellwerte im Lenkwinkelsignal gemessen werden. Jedoch hängen diese Schwellwerte stark von der Geschwindigkeit ab, denn Fahrstreifenwechsel bei niedrigen Geschwindigkeiten bedeuten hohe Lenkwinkelausschläge, bei hohen Geschwindigkeiten dagegen niedrige Lenkwinkelausschläge [168].
- **Wiedereinpendeln:** Diese Phase beginnt, sobald der Schwerpunkt des Fahrzeugs die Fahrstreifenmarkierung überschritten hat. Ist die Fahrtrichtung auf dem neuen Fahrstreifen in etwa parallel zur Fahrbahnmarkierung, so ist die Wiedereinpendeln-Phase und somit der gesamte Fahrstreifenwechsel abgeschlossen.

## 6.2 Informationskonzepte zur Unterstützung des Fahrers bei Fahrstreifenwechsel

Wie bereits in Kapitel 1 aufgezeigt, ist der Informationsfehler – d. h. wenn der Fahrer handlungsrelevante Informationen gar nicht oder zu spät wahrnimmt – eine der häufigsten Unfallursachen. Daher soll das in dieser Arbeit entwickelte Informationskonzept den Fahrer vor allem in der Orientierungsphase unterstützen und so die Entdeckungswahrscheinlichkeit von Fahrzeugen im toten Winkel erhöhen. Hierbei sollen die Wahrnehmung und Verarbeitung der Informationen fertigkeitbasiert – also auf der untersten Ebene des Handlungsmodells von Rasmussen – ablaufen und das räumliche Situationsbewusstsein verbessert werden.

Ein Beispiel stellt das iSense-Konzept von Gijssel et al. [56] dar, das eine „signalbasierte, richtungskodierte Informationsdarstellung auf Basis von Metaphern“ nutzt. Ein in acht Sektoren unterteilter Ring im HUD stellt die Schutzzonen um das Fahrzeug herum dar (z. B. vorne, hinten, Seite). In jeder Schutzzone gibt es drei Stufen, die von einer dezenten Information (Sektor leuchtet gelb, da Hindernis in entsprechender Schutzzone) bis zur aufdringlichen Warnung reichen (siehe Abb. 6.1). In einer Fahrstudie konnte eine

Verbesserung des Situationsbewusstseins nachgewiesen werden. Dennoch wurde die Bedeutung der i-Sense Schutzzonen im Erstkontakt nicht erkannt, weshalb nicht von einem besonders intuitiven Anzeigeconcept ausgegangen werden kann.



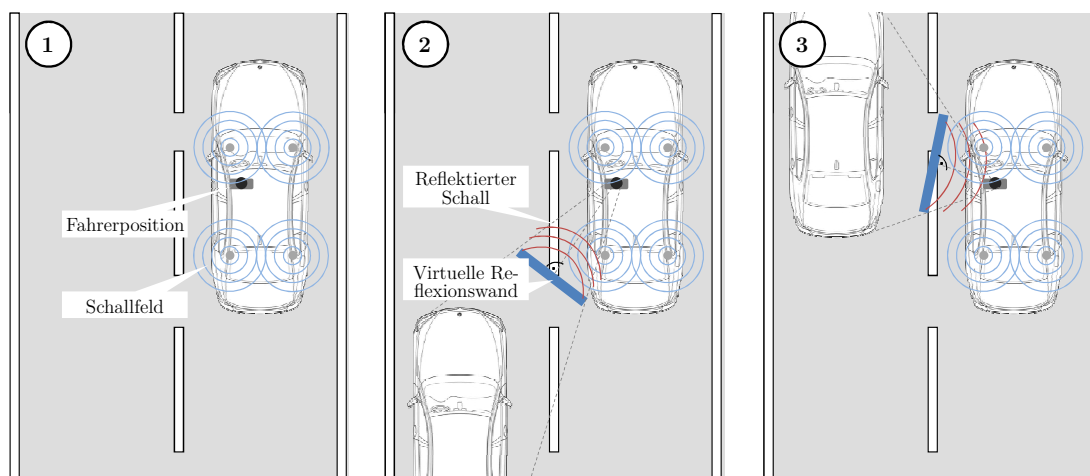
**Abbildung 6.1:** iSense-Anzeige im HUD: oben links: Auffahrinfo bzw. -warnung; oben rechts: Beispiele Parkassistenz; unten links: Spurwechselinfo bzw. -warnung (Fahrzeug im toten Winkel) [56]

Ein weiterer Nachteil dieses Ansatzes ist die Nutzung des visuellen Sinneskanals. Bei einem Fahrstreifenwechsel liegt ein Mehrfachkonflikt für den Fahrer vor. Sowohl der vorausfahrende Verkehr als auch der Bereich neben und hinter dem Fahrzeug müssen gleichzeitig überwacht werden. Hierdurch ist der visuelle Kanal bereits stark ausgelastet [143], weshalb die Darbietung zusätzlicher Informationen auf diesem Kanal vermieden werden sollte. Vielversprechend erscheint daher die Nutzung des beim Autofahren weitgehend ungenutzten auditiven Sinneskanals. Dies stützt vor allem die in Kapitel 2 beschriebene multiple Ressourcentheorie von Wickens, wonach mehrere modalitätsspezifische Einzelressourcen parallel und interferenzfrei genutzt werden können. Darüber hinaus beschreibt Previc [129] in seiner Arbeit, dass sich neben dem visuellen ebenso der auditive Sinneskanal zur Orientierung in der unmittelbaren Umgebung gut eignet („Action Extrapersonal Area“, ca. 2 Meter Handlungsradius). Somit bieten sich für Fahrstreifenwechsel gerichtete akustische Rückmeldungen an, die den Fahrer über die Richtung und Art der Gefahr informieren. Die Wirksamkeit solcher akustischen Rückmeldungen wurde bereits in zahlreichen Grundlagenuntersuchungen nachgewiesen (siehe Kap. 3.3.2). So wurde gezeigt, dass „3D-Sounds“ kürzere Blickzuwendungszeiten, schnellere Kopfbewegungen und somit kürzere Reaktionszeiten hervorrufen. Alle Untersuchungen aus dem Fahrerassistenzbereich haben jedoch gemein, dass die Warnausgaben zu einem späten Zeitpunkt der kritischen Verkehrssituation erfolgten, weshalb sie eher als Akutwarnungen zu verstehen sind.

Um der Forderung nach einer fertigkeitbasierten Verarbeitung der akustischen Rückmeldung gerecht zu werden, wird ein Informationskonzept entwickelt, das auf dem Prinzip der Echoortung basiert. Mit Hilfe der Echoortung kann die Lage und Entfernung von Objekten durch Aussenden von Schallwellen und Analyse der reflektierten Wellen ermittelt werden [74]. Dieses Prinzip wird sowohl von Tieren wie z. B. der Fledermaus als auch vom

Menschen zur Orientierung im Raum genutzt, ist von Geburt an gelernt und läuft absolut unbewusst und automatisch ab. Dennoch spielt es bei der Orientierung gegenüber dem visuellen Sinneskanal eine eher untergeordnete Rolle (Ausnahme: Blinde können sich mit Hilfe des „Klick-Sonars“ vollständig orientieren, was auch von Sehenden gelernt werden kann [136]). Übertragen auf Totwinkelsituationen ergibt sich somit folgendes neuartiges Informationskonzept (siehe Abb. 6.2):

1. Ist kein Fahrzeug in der Umgebung, befindet sich der Fahrer in einem unreflektierten Schallfeld (Wind-, Roll-, Motorengeräusch)
2. Nähert sich ein anderes Fahrzeug von hinten an, wird – ab einer bestimmten Entfernung – der Schall durch eine virtuelle Wand an der Position des anderen Fahrzeugs reflektiert (zur Vorstellung des Klangeindrucks: Einfahrt in Tunnel mit offenem Seitenfenster)
3. Die virtuelle Wand liegt im Lot zur Hörposition des Fahrers



**Abbildung 6.2:** Schematische Darstellung des Reflexionsprinzips über eine „virtuelle Wand“ [114]

Dieses akustische Informationskonzept zeichnet sich somit nicht wie bisher durch das Einbringen einer zusätzlichen Geräuschquelle aus (Auditory Icon, Earcon, etc. [117]), sondern durch die Änderung des bestehenden Schallfelds (hier: Reflexion). Das Schallfeld wird räumlich-gerichtet an dem vorbeifahrenden Fahrzeug über eine virtuelle Wand abhängig von dessen Entfernung unterschiedlich stark reflektiert.

In den folgenden Unterkapiteln wird der Effekt dieses neuartigen Informationskonzepts auf das Blick- und Fahrverhalten in Totwinkelsituationen analysiert. Hierfür wird das Informationskonzept in einen statischen Fahrsimulator integriert und in einer Probandenstudie bewertet<sup>2</sup>.

<sup>2</sup>Der Autor dankt Mag. rer. nat. Julia Hirzel für die Unterstützung bei der Versuchsdurchführung und -auswertung.



## 6.3 Fragestellungen und Hypothesengenerierung

Da die Ergebnisse aus Kapitel 5 zeigen, dass sich in kritischen Verkehrssituationen die Reaktion eines vorbereiteten Fahrers stark von der eines unvorbereiteten Fahrers unterscheidet, wird bei der Hypothesengenerierung zwischen zwei Bedingungen, bei denen das Informationskonzept erlebt werden kann, unterschieden:

1. **Bedingung – ohne Systemkenntnis:** Der Fahrer kennt das akustische Informationskonzept nicht, d. h. erlebt es unvorbereitet im sogenannten Erstkontakt und in einer überraschend auftretenden Totwinkelsituation.
2. **Bedingung – mit Systemkenntnis:** Der Fahrer kennt das akustische Informationskonzept und hat es bereits mehrfach in Totwinkelsituationen erlebt.

Unter der ersten Bedingung soll herausgefunden werden, ob das Prinzip der akustischen Reflexion zur Informationsdarstellung grundsätzlich funktioniert und wirksam ist (z. B. weniger Kollisionen). Unter der zweiten Bedingung soll untersucht werden, wie Fahrer mit Systemkenntnis ihr Blick- und Fahrverhalten bei bewusster Nutzung des Informationskonzepts verändern. Alle im Folgenden für das Blick- und Fahrverhalten generierten Hypothesen stellen einen Vergleich mit einer Baseline dar – also einer Totwinkelsituation, in der die Fahrer keine Reflexion erhalten und ausschließlich das eigene Motoren-, Roll- und Windgeräusch hören.

### 6.3.1 Blickverhalten

Im Bezug auf das Blickverhalten ergibt sich folgende Hauptfragestellung:

**Fragestellung 1:** *Wie wird das Blickverhalten durch das Informationskonzept bei einem Fahrstreifenwechsel beeinflusst?*

#### **Hypothesengenerierung bei Fahrern ohne Systemkenntnis (1. Bedingung):**

Der Fahrer kann bei einem Fahrstreifenwechsel die zusätzliche akustische Rückmeldung zur Orientierung nutzen (Redundant signals effekt, siehe Kap. 3). Da der Fahrer – unter der Annahme der 1. Bedingung – nicht unbedingt mit einem Fahrzeug im toten Winkel rechnet, ist anzunehmen, dass er durch die akustische Rückmeldung verstärkt nach dem Fahrzeug im toten Winkel sucht. Somit wird angenommen, dass das Informationskonzept das Absicherungsverhalten bei einem unvorbereiteten Fahrer in der Orientierungsphase erhöht, weshalb sich folgende Hypothese ergibt:

**Hypothese 1a:** Bei Fahrern ohne Systemkenntnis erhöht das Informationskonzept die Anzahl der Absicherungsblicke nach hinten und zur Seite.

#### **Hypothesengenerierung bei Fahrern mit Systemkenntnis (2. Bedingung):**

Geht man dagegen von einem Fahrer aus, der das Informationskonzept bereits kennt und dieses bewusst beim Fahrstreifenwechsel nutzt, so ist anzunehmen, dass die visuelle Absicherungsaktivität aufgrund der kongruenten Information abnimmt. Durch die zusätzliche akustische Rückmeldung ist der Fahrer in der Lage, das Fahrzeug im toten Winkel bereits

frühzeitig wahrzunehmen. Die Absicherungsaktivität kann hierbei auf zwei Sinneskanäle verteilt werden (visuell und auditiv). Den Fahrern, die keine akustische Rückmeldung erhalten, steht ausschließlich der visuelle Sinneskanal zur Absicherung des seitlichen und rückwärtigen Verkehrs zur Verfügung, weshalb auf diesem Kanal die gesamte Absicherungsaktivität erfolgen muss. Folgende Hypothese wird daher angenommen:

**Hypothese 1b:** Bei Fahrern mit Systemkenntnis reduziert das Informationskonzept die Anzahl der Absicherungsblicke nach hinten und zur Seite.

### **Hypothesengenerierung für beide Bedingungen:**

Da das Informationskonzept keine eigene Geräuschquelle darstellt, sondern das bestehende Schallfeld moduliert, ist von einer sehr dezenten und eher subtilen Informationsdarstellung auszugehen. Daher ergibt sich für Fahrer, die das Informationskonzept sowohl unter der ersten als auch der zweiten Bedingung erleben, folgende Hypothese:

**Hypothese 1c:** Hat der Fahrer nicht die Absicht den Fahrstreifen zu wechseln, während sich ein Fahrzeug im toten Winkel befindet, so hat das Informationskonzept keinen Einfluss auf das Blickverhalten.

## 6.3.2 Fahrverhalten

In Bezug auf das Fahrverhalten soll folgende Hauptfragestellung untersucht werden:

**Fragestellung 2:** *Wie wird das Fahrverhalten durch das Informationskonzept bei einem Fahrstreifenwechsel beeinflusst?*

### **Hypothesengenerierung bei Fahrern ohne Systemkenntnis (1. Bedingung):**

Da angenommen wird, dass das Informationskonzept bei Fahrern ohne Systemkenntnis mehr Absicherungsblicke in der Orientierungsphase verursacht, ergibt sich folgende Hypothese:

**Hypothese 2a:** Bei Fahrern ohne Systemkenntnis erhöht das Informationskonzept die Dauer der Orientierungsphase.

Aufgrund der Annahme von Hypothese 1a und 2a ist davon auszugehen, dass Fahrer, die durch das Informationskonzept unterstützt werden, das Fahrzeug im toten Winkel entdecken und dadurch entsprechende Änderungen in der Längsführung vornehmen. Folgende Hypothesen werden daher angenommen:

**Hypothese 2b:** Bei Fahrern ohne Systemkenntnis, die durch das Informationskonzept unterstützt werden, ist der Anteil der Fahrer höher, die eine Änderung der Längsführung durch Beschleunigen oder Abbremsen vornehmen als bei Fahrern der Baseline.

Unter dieser Annahme kann folgende Hypothese abgeleitet werden:

**Hypothese 2c:** Bei Fahrern ohne Systemkenntnis, die durch das Informationskonzept unterstützt werden, kommt es zu weniger Kollisionen mit dem Fahrzeug im toten Winkel als bei Fahrern, die keine Unterstützung erhalten (Baseline).

**Hypothesengenerierung bei Fahrern mit Systemkenntnis (2. Bedingung):**

Geht man dagegen von einem Fahrer mit Systemkenntnis aus, so ist anzunehmen, dass Fahrer bereits zum Zeitpunkt der Intention für einen Fahrstreifenwechsel ein umfangreiches räumliches Situationsbewusstsein besitzen. Demzufolge sollten Fahrer, die durch das Informationskonzept unterstützt werden, den Fahrstreifenwechsel unmittelbarer einleiten. Daher werden folgende Hypothesen angenommen:

**Hypothese 2d:** Im Vergleich zur Baseline bewirkt das Informationskonzept bei Fahrern mit Systemkenntnis eine schnellere Fahrerreaktion (Gasgeben oder Bremsen).

Unter dieser Annahme kann folgende Hypothese abgeleitet werden:

**Hypothese 2e:** Die Dauer des gesamten Fahrstreifenwechsels ist bei Fahrern mit Systemkenntnis, die durch das Informationskonzept unterstützt werden, kürzer als bei Fahrern, die keine Unterstützung erhalten (Baseline).

Zu den oben aufgeführten Hypothesen wird zusätzlich der Effekt des Informationskonzepts auf die Längs- (z. B. mittlere Geschwindigkeit) und Querverführung (Spurhaltung, etc.) in den einzelnen Handlungsphasen explorativ analysiert.

### 6.3.3 Subjektive Bewertung

Bei der subjektiven Bewertung wird nicht wie zuvor zwischen den zwei Voraussetzungen aus Kapitel 6.3 unterschieden. Hierbei ergeben sich zwei Fragestellungen:

**Fragestellung 3:** *Welche Akzeptanz hat das Informationskonzept bei den Fahrern?*

**Fragestellung 4:** *Welchen Effekt hat das Informationskonzept auf das räumliche Situationsbewusstsein?*

**Hypothesengenerierung:**

Aus der Literatur ist bekannt, dass häufig vorkommende akustische Warnungen eine geringe Akzeptanz aufweisen, da sie als störend empfunden werden (siehe Kap. 3.3.2, vgl. auch [22]). Diese Erkenntnisse beziehen sich jedoch auf eher aufdringliche Warntöne (z. B. Sinus-Ton). Da das hier beschriebene Informationskonzept aus einer eher dezenteren Änderung des bestehenden Schallfelds besteht, wird folgende Hypothese angenommen:

**Hypothese 3a:** Das Informationskonzept wird als angenehmer und weniger störend empfunden als aufdringliche Warntöne (z. B. Sinus-Ton).

Im Bezug auf die vierte Fragestellung ist anzunehmen, dass zusätzliche akustische Rückmeldungen eine höhere Entdeckungswahrscheinlichkeit bewirken [73]. Daher wird folgende Hypothese angenommen:

**Hypothese 3b:** Fahrer, die durch das Informationskonzept unterstützt werden, nehmen Fahrzeuge im toten Winkel häufiger bewusst wahr als Fahrer, die keine Unterstützung erhalten (Baseline).

## 6.4 Voruntersuchung: Auditive Wahrnehmbarkeit von vorbeifahrenden Fahrzeugen im Realverkehr

Zur Gestaltung akustischer Rückmeldungen im automobilen Kontext schlagen Nees und Walker [117] in ihrem Literatur-Review drei Gestaltungsrichtlinien vor:

1. **Erkennbarkeit** (englisch: Detectability): Nimmt der Fahrer die akustische Ausgabe wahr?
2. **Unterscheidbarkeit** (englisch: Discriminability): Kann der Fahrer die akustische Ausgabe von anderen Klängen unterscheiden?
3. **Identifizierbarkeit** (englisch: Identifiability): Kann der Fahrer die akustische Ausgabe identifizieren und versteht er deren Bedeutung?

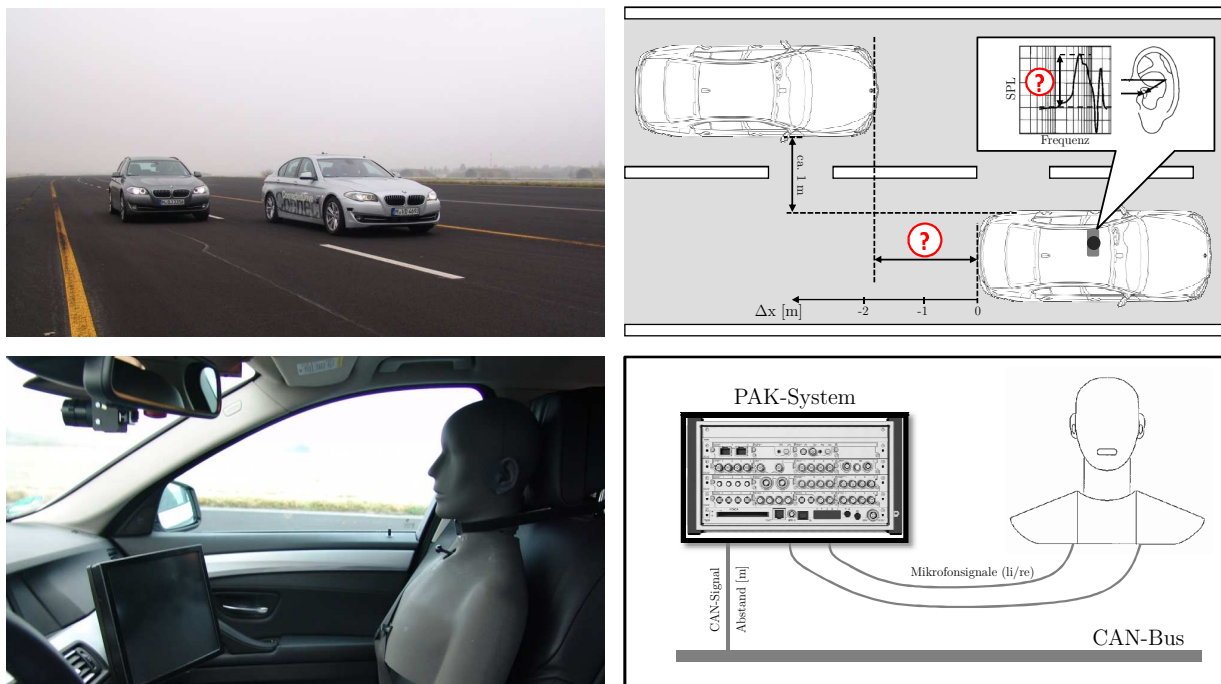
Demzufolge besteht die Herausforderung, den Pegel der Reflexion so auszulegen, dass der Fahrer die Klangänderung zwar wahrnimmt und versteht, aber gleichzeitig nicht gestört wird. Als Faustregel gilt: Bei einem gleichbleibenden Geräusch über 40 dB SPL ist ein Schallpegelunterschied von 1 dB SPL kaum wahrnehmbar, 3 dB SPL sind deutlich wahrnehmbar und 10 dB SPL entsprechen einem etwa doppelten oder halbierten subjektiven Lautheitseindruck [45]. Das in dieser Arbeit entwickelte Informationskonzept soll als dezent und nicht zu aufdringlich empfunden werden und darf somit keinen größeren Schalldruckpegelunterschied als 3 dB SPL hervorrufen.

Zur Auslegung des Informationskonzepts muss jedoch zuerst untersucht werden, ab welcher Entfernung und in welchem Ausmaß vorbeifahrende Fahrzeuge im Straßenverkehr auditiv wahrnehmbar sind. Aus diesen Erkenntnissen kann zum einen der Zeitpunkt der Informationsausgabe und zum anderen das Ausmaß der akustischen Verstärkung abgeleitet werden. Da hierzu keine Angaben in der Literatur zu finden sind, wird eine Schalldruckmessung im Realfahrzeug mit folgenden Fragestellungen durchgeführt:

1. Ab welcher Entfernung zum vorbeifahrenden Fahrzeug ist eine Veränderung des Schalldruckpegels im Fahrzeuginnenraum physikalisch messbar? Welche Frequenzbereiche (Terzbänder) sind hierbei wie stark beteiligt?
2. Welchen Einfluss hat dabei die Differenzgeschwindigkeit des vorbeifahrenden Fahrzeugs?

Mit zwei Versuchsträgern der BMW 5er Baureihe wird hierfür eine Messung auf einem geraden Streckenabschnitt durchgeführt. Auf dem Beifahrersitz des Messfahrzeugs ist ein Kunstkopf befestigt, mit dem der im Fahrzeuginnenraum herrschende Schall über ein mobiles PAK-System der Firma Müller BBM aufgezeichnet wird. Im Gegensatz zu herkömmlichen Messmikrofonen kann mit Hilfe des Kunstkopfs das räumliche Klangspektrum genauer analysiert werden, da durch die nachgebildete Kopf- und Ohrform die richtungsabhängige Außenohrübertragungsfunktion (HRTF) mit berücksichtigt wird. Zusätzlich wird das CAN-Signal des relativen longitudinalen Abstands zum vorbeifahrenden Fahrzeug aufgezeichnet. Hierdurch ist es möglich, Pegel- und Spektralanalysen des Schalldruckpegels in

Abhängigkeit von der Zeit und der Entfernung zum vorbeifahrenden Fahrzeug durchzuführen (siehe Abb. 6.3).

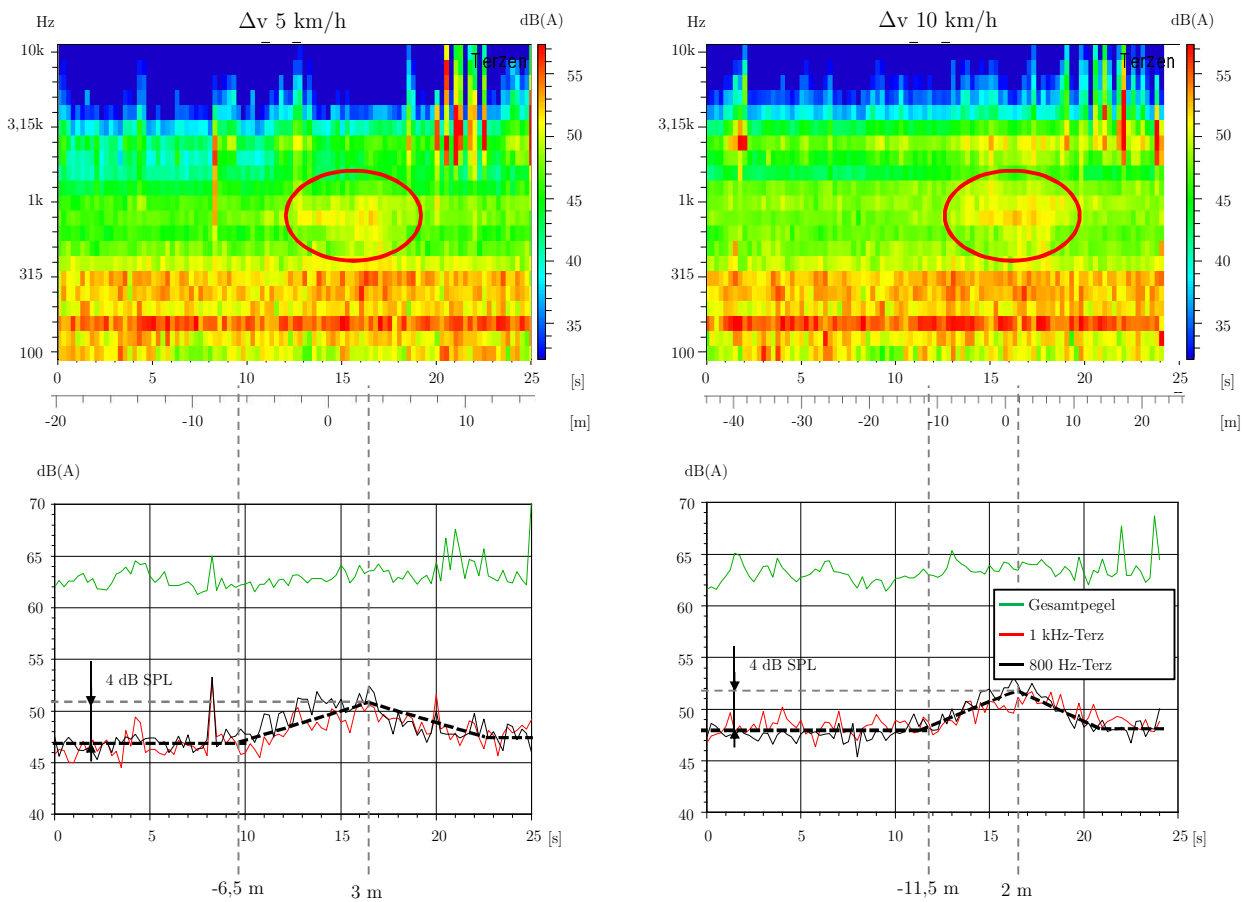


**Abbildung 6.3:** Schalldruckmessung auf dem Testgelände und gesuchte Messgrößen (oben), Messaufbau mit Kunstkopf und PAK-System (unten)

Das Messfahrzeug fährt konstant mit 60 km/h auf dem linken Fahrstreifen und wird von dem zweiten Versuchsträger mit zwei unterschiedlichen Differenzgeschwindigkeiten ( $\Delta v = 5$  km/h und  $\Delta v = 10$  km/h) rechts überholt. Der Kunstkopf befindet sich somit in einem vergleichbaren Schallfeld, wie es bei einem links vorbeifahrenden Fahrzeug in der Fahrerposition vorliegt. Das Messfahrzeug wird in einem lateralen Abstand von ca. einem Meter überholt (siehe Abb. 6.3). Die Entfernung zum vorbeifahrenden Fahrzeug wird von der Heckstoßstange des Messfahrzeugs (Position des Radarsensors) bis zur Frontstoßstange des vorbeifahrenden Fahrzeugs gemessen (Koordinatenursprung und -richtung siehe Abb. 6.3 oben rechts). Ab einem longitudinalen Abstand von ca. + 4,9 Metern (dies entspricht in etwa einer Fahrzeuglänge) befinden sich beide Fahrzeuge auf gleicher Höhe.

In Abbildung 6.4 sind die Frequenzspektren der Schalldruckpegel in Abhängigkeit von der Zeit und der Entfernung zum vorbeifahrenden Fahrzeug (oben), die Schalldruckpegel der 800 Hz- und 1 kHz-Terz und der Gesamtpegel (unten) dargestellt. Bei Betrachtung beider Differenzgeschwindigkeiten fällt auf, dass durch das vorbeifahrende Fahrzeug eine spektrale Veränderung überwiegend im 1 kHz Bereich stattfindet (roter Kreis, Abb. 6.4). Die durchgehend hohen Pegel unterhalb 315 Hz entstehen aufgrund von Rollgeräuschen und die impulsartigen Pegelausschläge um die 3 kHz aufgrund von Fahrbahnebenenheiten. Im Gesamtschalldruckpegel ist kein Einfluss des vorbeifahrenden Fahrzeugs erkennbar. Dagegen steigt der Schalldruckpegel bei beiden Differenzgeschwindigkeiten in der 800 Hz- und 1 kHz-Terz um bis zu 4 dB SPL an. Somit ist das vorbeifahrende Fahrzeug am besten auditiv

wahrnehmbar, sobald sich dessen Frontstoßstange ungefähr zwischen der A- und B-Säule des Messfahrzeugs befindet (bei  $\Delta v = 5$  km/h in einer Entfernung von + 3 Metern, bei  $\Delta v = 10$  km/h in einer Entfernung von + 2 Metern). Rein physikalisch ist ein Anstieg der 800 Hz- und 1 kHz-Terz bei  $\Delta v = 5$  km/h bereits ab einer Entfernung von ca. - 6,5 Metern und bei  $\Delta v = 10$  km/h ab einer Entfernung von ca. - 11,6 Metern messbar. Deutlich wahrnehmbar (3 dB-Schwelle) ist der Vorbeifahrer jedoch erst auf Höhe der eigenen Heckstoßstange (Entfernung ca. 0 bis +1 Meter). Im Vergleich zur Differenzgeschwindigkeit  $\Delta v = 5$  km/h ergibt sich bei  $\Delta v = 10$  km/h eine Frequenzgang-Verschiebung. So ist hier eine Zunahme der Schalldruckpegel höherer Frequenzbänder um die 2 bis 3 kHz zu erkennen.



**Abbildung 6.4:** Schalldruckpegel  $L_p$ : Frequenzspektrum (oben) und Gesamt- und Einzelpegel der 800 Hz- und 1 kHz-Terz (unten) für verschiedene Differenzgeschwindigkeiten der Vorbeifahrer (A-Bewertet, nur rechter Kanal dargestellt)

In Bezug auf die drei anfangs aufgestellten Fragestellungen können somit folgende Aussagen getroffen werden:

1. Eine Änderung des gesamten Schalldruckpegels ist bei niedrigen Differenzgeschwindigkeiten ( $\Delta v = 5$  km/h und  $\Delta v = 10$  km/h) nicht erkennbar. Dagegen ist eine Änderung des Schalldruckpegels im Bereich der 800 Hz- und 1 kHz-Terz bereits ab

einer Entfernung von mehreren Metern (6 bis 11 m) messbar. Subjektiv wahrnehmbar ist ein Vorbeifahrer jedoch ungefähr ab einer Entfernung von 0 bis +1 Meter (abhängig von der Differenzgeschwindigkeit).

2. Eine geringe Zunahme der Differenzgeschwindigkeit (+ 5 km/h) hat keinen Einfluss auf die maximale Schalldruckpegeländerung (4 dB SPL sowohl bei der 800 Hz- als auch 1 kHz-Terz). Subjektiv wird eine höhere Differenzgeschwindigkeit jedoch lauter wahrgenommen, da hier der Gradient der Pegelzunahme entscheidend ist [45]. Außerdem findet bei höheren Differenzgeschwindigkeiten eine Frequenzgang-Verschiebung in Richtung hörempfindlicheren Frequenzbändern statt (2 - 3 kHz). Demnach kann in einem Geschwindigkeitsbereich zwischen 60 und 70 km/h davon ausgegangen werden, dass je höher die Differenzgeschwindigkeit ist, desto früher ist der Vorbeifahrer auditiv wahrnehmbar (subjektiv und physikalisch).

Für die Gestaltung des akustischen Informationskonzepts bedeutet dies: Vor allem Fahrzeuge, die sich mit sehr niedriger Differenzgeschwindigkeit ( $\Delta v < 5$  km/h) im toten Winkel bewegen oder konstant nebenher fahren, sollten dem Fahrer zeitlich früher und verstärkt dargestellt werden, da sie in einer Totwinkelsituation spät auditiv wahrnehmbar sind.

## 6.5 Bewertungsmethodik

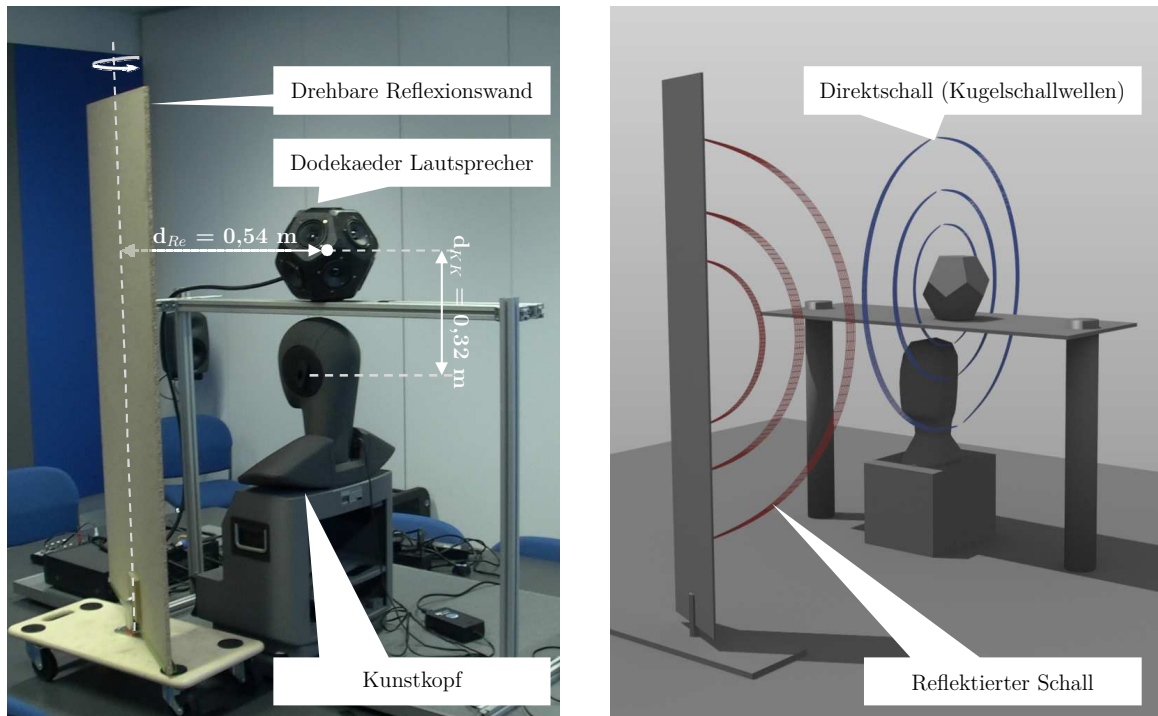
Im Folgenden wird die technische Umsetzung des Informationskonzepts im statischen Fahr-simulator beschrieben und eine Methodik zur Bewertung der Wirksamkeit der akustischen Reflexion vorgestellt.

### 6.5.1 Technische Umsetzung

Zur prototypischen Darstellung des Informationskonzepts wird das Kunstkopf-Verfahren verwendet. Mit dem Kunstkopf können nicht nur richtungsabhängige Spektralanalysen des Schallfeldes durchgeführt werden, sondern räumlich-gerichtete Klangereignisse aufgezeichnet und originalgetreu per Kopfhörer wiedergegeben werden. Der Hörer erhält den räumlichen Klangeindruck, der exakt an der Position des Kunstkopfs vorlag. Somit kann durch die originalgetreue Aufzeichnung und Wiedergabe von räumlichen Schallereignissen eine vergleichende, reproduzierbare und gehörgerechte Beurteilung von unterschiedlichen Geräuschsituationen durchgeführt werden [31] [120].

#### **Kunstkopfaufnahme:**

Für die Umsetzung des Reflexionsprinzips aus Abbildung 6.2 wird die „akustische Szene“ mit entsprechenden Requisiten im Semifreifeld-Raum nachgestellt (siehe Abb. 6.5). Als virtuelle Reflexionswand dient eine 1,0 x 1,8 Meter (Breite x Höhe) Holzplatte, deren Oberfläche mit einer zwei Millimeter dicken Metallplatte beklebt ist. Dadurch besitzt die Reflexionswand einen sehr hohen Reflexionsgrad [173].



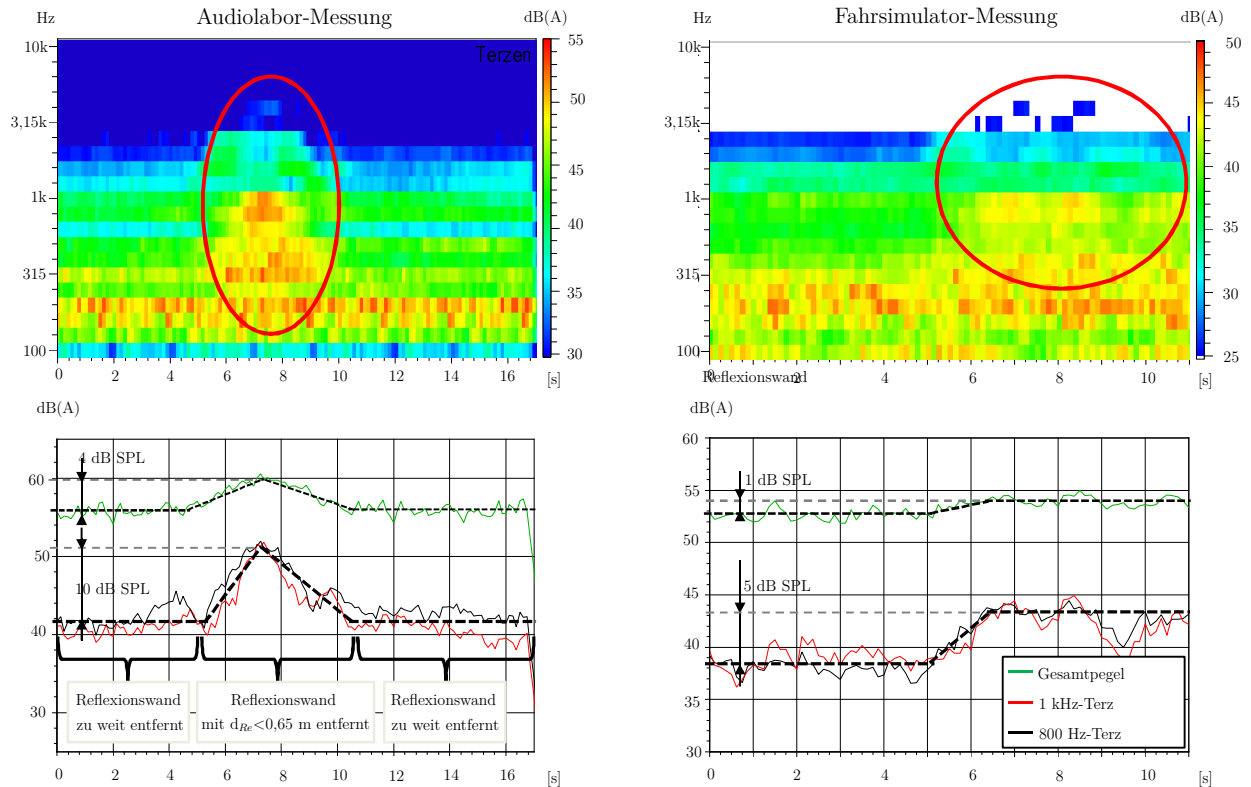
**Abbildung 6.5:** Messaufbau im Audiolabor (links), schematische Darstellung des Schallfelds (rechts)

Die Reflexionswand ist drehbar auf einer durch Rollen beweglichen Plattform befestigt, so dass sie aus jeder Position im Lot zur Schallquelle ausgerichtet werden kann. Als Schallquelle dient ein Dodekaeder-Lautsprechersystem, das aus zwölf Einzellautsprechern besteht und eine kugelförmige Abstrahlcharakteristik besitzt. Der Dodekaeder-Lautsprecher ist auf einer Vorrichtung im Abstand von 23 cm oberhalb des Kunstkopfs positioniert ( $d_{kk}$ , siehe Abb. 6.5). Das Schallsignal ist ein aus dem Fahr Simulator bei 60 km/h aufgenommenes Fahrgeräusch – bestehend aus Wind-, Roll- und Motorengeräusch.

Für die Aufnahme des akustischen Informationskonzepts wird die Reflexionswand mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten an der Schallquelle vorbeigeschoben. Die Fahrspur der Reflexionswand ist dabei parallel um 54 cm ( $d_{Re}$ , siehe Abb. 6.5) von der Symmetrieachse des Kunstkopfs versetzt. Damit auch in einer größeren Entfernung eine Reflexion wahrnehmbar ist, wird die Reflexionswand an jeder Position im Lot zum Kunstkopf ausgerichtet.

In Abbildung 6.6 (links) ist die Spektral- und Schalldruckpegelanalyse des Schallfelds am linken Kunstkopfohr – also an dem Ohr, das zur Reflexionswand gerichtet ist – dargestellt. So ist zu erkennen, dass der Gesamtpegel durch die Reflexionswand um 4 dB SPL angehoben wird, wobei hauptsächlich der Frequenzbereich um die 1 kHz-Terz verstärkt wird (ca. 10 dB SPL). Somit ist die Reflexion deutlich wahrnehmbar, da der Frequenzbereich zwischen 1 und 2 kHz zu dem sensitivsten Hörbereich des Menschen gehört. Zusätzlich trägt der Frequenzbereich um die 1 kHz bedeutend zur räumlichen Ortung von Schallereignissen, die sich hinter dem Hörerenden befinden, bei (siehe Kapitel 2.3.2).





**Abbildung 6.6:** Schalldruckpegel  $L_p$ : Frequenzspektrum und Gesamt- und Einzelpegel der 800 Hz- und 1 kHz-Terz der Audiolabor- (links) und Fahrsimulator- messung (rechts), gemessen am linken Kunstkopfhörer. Die rote Markierung stellt die durch die Reflexionswand verursachte Schalldruckänderung dar

Weitere akustische Phänomene, die für das akustische Informationskonzept charakterisierend sind, werden im Folgenden kurz beschrieben:

**Schallreflexion und Schallschatten:** Abhängig von der Größe und Oberflächenbeschaffenheit eines Hindernisses werden Schallwellen unterschiedlich stark reflektiert. Dabei entsteht ein Schallschatten auf der von der Schallquelle abgewandten Seite des Hindernisses. Alle Schallanteile, deren Wellenlängen größer als die Ausdehnung des Hindernisses sind, werden um das Hindernis herum gebeugt, kürzere Wellenlängen (also hohe Frequenzanteile) werden reflektiert oder auf der schallabgewandten Seite gedämpft. Der Übergang von Wellenlängen, die um das Hindernis herum gebeugt oder an diesem reflektiert werden, ist fließend. Mit der oben beschriebenen einen Meter breiten Reflexionswand werden somit nur Schallwellen, deren Frequenz höher als 334 Hz ist, reflektiert, was sich mit der Messung aus Abbildung 6.6 (links) deckt (Berechnung Grenzfrequenz:  $f = c/d$ , mit  $c$ : Schallgeschwindigkeit bei 293,15 K = 343 m/s<sup>2</sup>, mit  $d$ : Hindernisbreite [m] folgt  $f(d = 1 \text{ m}) = 343 \text{ Hz}$  [31]).

**Echo und Kammfilter:** Ist die Reflexion einer Schallwelle so stark verzögert, dass diese als separates Hörereignis wahrgenommen wird, so wird dies als Echo bezeichnet [12].

Die Echowahrnehmungsschwelle – also die zeitliche Verzögerung zwischen Direktschall und Reflexion – ist abhängig von der Klangcharakteristik und beginnt ab ungefähr 20 ms. Befindet sich die Reflexionswand in dem oben beschriebenen Messaufbau exakt neben dem Kunstkopf, so benötigt der Direktschall von der Schallquelle bis zum Kunstkopf ca. 0,93 ms und die Reflexion ca. 3,1 ms (Berechnung Laufzeit Direktschall:  $t = d_{KK}/c$ ; Berechnung Laufzeit Reflexion:  $t = 2d_{Re}/c$ , siehe Abb. 6.5). Somit ergibt sich für den vorliegenden Messaufbau eine Verzögerungszeit von 2,17 ms zwischen dem Direktschall und der Reflexion. Diese führt jedoch nicht zu einem Echo, sondern zu dem sogenannten Kammfilter-Effekt. Aufgrund der zeitverzögerten Überlagerung des Direktschalls durch die Reflexion, werden Frequenzen, deren Periodendauer oder ein Vielfaches davon der Verzögerungszeit entsprechen, verstärkt, dazwischenliegende Frequenzen ausgelöscht oder abgeschwächt. Hierdurch ist kein separates Hörereignis wahrnehmbar, vielmehr wird die Klangfarbe durch den Kammfilter verändert [31] [45].

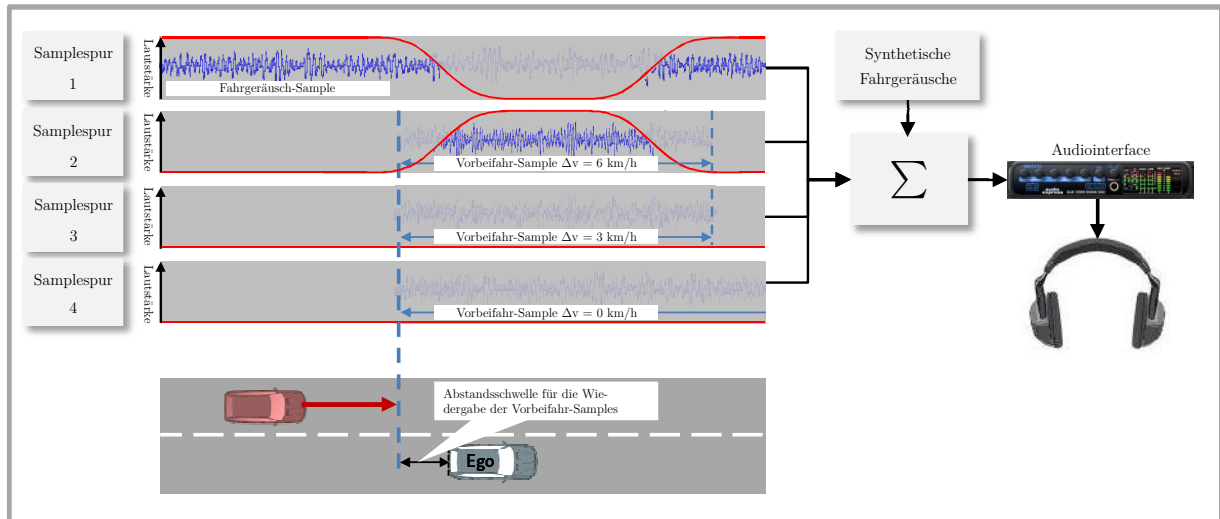
Somit wird das bestehende Schallfeld durch das Informationskonzept auf zwei Arten moduliert: Zum einen wird der Schalldruckpegel zwischen 300 Hz bis 3 kHz verstärkt, zum anderen die Klangfarbe (Tonhöhe) aufgrund des Kammfilter-Effekts abhängig von der Position der Reflexionswand unterschiedlich stark verändert.

Drei Vorbeifahrten (Samples) werden per Kunstkopfverfahren aufgenommen und in den Fahrsimulator integriert, jeweils für eine Differenzgeschwindigkeit von  $\Delta v = 6$  km/h,  $\Delta v = 3$  km/h und  $\Delta v = 0$  km/h – letzteres für ein mit konstanter Geschwindigkeit fahrendes Fahrzeug im toten Winkel.

### **Fahrsimulatorintegration:**

Für die Darstellung des Informationskonzepts im Fahrsimulator ist ähnlich wie in Kapitel 5.3.1 ein zentraler Ausgabenkoordinator in dem Cosimulations-Modul der Fahrsimulation implementiert. Dieser berechnet die Differenzgeschwindigkeit vorbeifahrender Fahrzeuge, wählt daraus eine der drei Kunstkopfaufnahmen und spielt das entsprechende Sample ab einem bestimmten relativen Abstand zum vorbeifahrenden Fahrzeug ab. Die fünf bis zehn Sekunden langen Samples sind auf virtuellen Tonspuren im Sound-Modul als Wave-Dateien hinterlegt (siehe Abb. 6.7) und werden zu dem hier synthetisch generierten Eigenfahrgeräusch mit 60 % des Gesamtausgabepegels hinzu gemischt. Damit der räumliche Eindruck der Kunstkopfaufnahme erhalten bleibt, wird der gesamte Fahrsimulations-Sound über Kopfhörer ausgegeben.

Da sich das Fahrgeräusch der Kunstkopfaufnahme anders als das im Sound-Modul synthetisch generierte Fahrgeräusch anhört (mehr Rauschanteile aufgrund der Übertragungsstecke vom Dodekaederlautsprecher zum Kunstkopf), ist das zusätzliche Abspielen der Samples hörbar. Dies entspricht jedoch nicht der Konzeptidee, das bestehende Schallfeld zu verändern. Daher wird zum synthetisch erzeugten Fahrgeräusch permanent eine Kunstkopfaufnahme des stationären Fahrgeräusches (60 km/h) ohne Reflexion hinzu gemischt (siehe Abb. 6.6 links). Der Lautstärkepegel dieses Samples wird linear mit der Fahrgeschwindigkeit verändert ( $0$  km/h  $\hat{=}$  0 % Lautstärkepegelanteil;  $60$  km/h  $\hat{=}$  60 %). Fährt ein Fahrzeug an dem Egofahrzeug vorbei, so wird der Lautstärkepegel des stationären Fahrgeräusch-Samples ausgeblendet und der Pegel des entsprechenden Vorbeifahrer-



**Abbildung 6.7:** Audio-Mixing der Kunstkopfaufnahmen zum synthetischen Fahrgeräusch im Sound-Modul

Samples eingeblendet (siehe Abb. 6.7). Durch das Hinzumischen des Fahrgeräusch-Samples wird der Fahrsimulator-Sound zwar generell verändert (mehr Rauschanteile), jedoch ist hierdurch der Übergang zwischen den verschiedenen Samples nicht mehr hörbar.

Abbildung 6.6 rechts (S. 97) zeigt das im Sound-Modul generierte Klangbild der Totwinkelsituation aus Kapitel 6.5.3. Die Pegeländerung des Gesamtschalldruckpegels ist durch das Zusammenmischen des synthetischen Fahrgeräusches und der Vorbeifahrer-Samples niedriger als bei der reinen Kunstkopfaufnahme im Semifreifeld (siehe Abb. 6.6, links). Dies lässt sich auf das Zusammenmischen des synthetisch generierten Fahrgeräusches und der Kunstkopf-Samples zurückführen (Maskierungseffekte). So erhöht die im Sound-Modul hinzu gemischte Reflexion den Gesamtschalldruckpegel um ca. 1 dB SPL (ca. 5 dB SPL im Bereich der 800 Hz- und 1 kHz-Terz), weshalb sie nach der Definition von Fastl und Zwicker [45] hörbar, jedoch nicht sehr aufdringlich ist.

## 6.5.2 Operationalisierung

Die Hypothesenprüfung basiert auf den folgenden abhängigen Variablen der Datenebenen Blick-, Fahrverhalten und subjektive Bewertung:

### **Blickverhalten:**

Das Blickverhalten wird mit dem Head-mounted Eyetracker Dikablis mit 25 FPS aufgezeichnet. Zur Bewertung des Absicherungsverhaltens nach hinten und zur Seite werden die drei AOIs „Innenspiegel“, „Außenspiegel“ und „Schulterblick“ definiert. In das AOI „Schulterblick“ wird geblickt, sobald sich die Blickrichtung in der Mitte der linken Seitenscheibe befindet. Gemessen werden die mittlere Blickanzahl  $n_{AOI}$  [n] und Blickdauer  $t_{AOI}$  [s], also wie oft bzw. lange die Fahrer in das entsprechende AOI blicken. Praxenthaler [128] fand in einer Simulatorstudie heraus, dass manche Fahrer überwiegend den Außenspiegel

(„Außenspiegeltyp“), andere dagegen den Innenspiegel („Innenspiegeltyp“) zur Absicherung des rückwärtigen Verkehrs verwenden. Aufgrund dieser individuellen Unterschiede im Absicherungsverhalten wird zusätzlich die „Summe“ aller Absicherungsblicke ausgewertet, also die Gesamtanzahl [n] bzw. -dauer [s] der Blicke in den AOIs „Innenspiegel“, „Außenspiegel“ und „Schulterblick“. Die Auswertung der Blickdauern und -anzahl erfolgt mit der Software D-Lab mittels visueller Inspektion „Frame für Frame“.

### **Fahrverhalten:**

Alle Fahrdaten werden mit einer Frequenz von 100 Hz aufgezeichnet. Das Fahrverhalten wird durch die Dauer der Orientierungs-  $t_{Orient}$  [s], Handlungsphase  $t_{Handlung}$  [s] und des gesamten Fahrstreifenwechsels  $t_{Gesamt}$  [s] bewertet. In der Orientierungs- und Handlungsphase wird die Anzahl der Fahrer, die ein Brems- oder Beschleunigungsmanöver  $n_{Längsregulation}$  [n] durchführen, bzw. eine Kollisionen  $n_{Kollision}$  [n] verursachen, ausgewertet. Darüber hinaus wird die Reaktionszeit bis zur ersten Längsregulation  $t_{Längsregulation}$  [s] bestimmt, die vom Beginn der Orientierungsphase bis zu einer Änderung der Gas- oder Bremspedalstellung gemessen wird (hier: Gaspedalstellung  $\gamma > 50\%$  bzw. Bremsdruck  $p_{Brems} > 0\%$ ). Zusätzlich werden in jeder Phase des Fahrstreifenwechsels der Mittelwert der lateralen Spurposition MLP (englisch: Mean Lateral Position) [m] und deren Standardabweichung SDLP (englisch: Standard Deviation Lateral Position) [m] gemessen. Die laterale Spurposition ist hier der orthogonale Abstand des Fahrzeugschwerpunkts zur linken Fahrstreifenmarkierung.

### **Subjektive Bewertung:**

Mit Hilfe eines Akzeptanzfragebogens bewerten die Fahrer das Informationskonzept. Der Fragebogen orientiert sich an dem Vorschlag von Laan et al. [99] und beinhaltet die Befragung nach den Eigenschaftspaaren („items“) natürlich - synthetisch, unaufdringlich - aufdringlich, angenehm - störend und nützlich - unnützlich auf einer Skala von - 2 bis + 2 (siehe Anhang B.3).

Zur Bewertung des räumlichen Situationsbewusstseins wird das Prinzip des „Einfrierens“ der SAGAT-Methode verwendet. Dieses aus der Luftfahrt stammende Verfahren misst durch Einfrieren der Simulation und Befragung zur erlebten Situation das Situationsbewusstsein [41]. Nach der Definition von Endsley [41] beziehen sich die gestellten Fragen auf die drei Ebenen des Situationsbewusstseins (perception, comprehension, projection). Im Rahmen dieser Untersuchung wird nur die erste Ebene – perception – geprüft, da die Simulation erst dann eingefroren wird, sobald der Fahrer den Fahrstreifenwechsel beendet. Die Simulation wird somit am Ende der Wiedereinpendeln-Phase gestoppt. Die Befragung nach dem Verständnis und der zukünftigen Entwicklung der Verkehrssituation ist somit irrelevant, da der Fahrstreifenwechsel bereits abgeschlossen ist. Nach dem Einfrieren der Simulation werden die Fahrer gebeten, die Fahrzeuge auf einem Blatt Papier einzuzeichnen, die ihnen vor dem Fahrstreifenwechsel aufgefallen sind (siehe Anhang B.3).

### 6.5.3 Versuchsdesign

Aufgrund der zwei Bedingungen aus Kapitel 6.3 ergeben sich gegensätzliche Anforderungen an das Versuchsdesign. Daher ist der Versuch in zwei Teile gegliedert:

- **Teil a – Realsituation:** Die Fahrer haben keine Systemkenntnis und erleben das Informationskonzept in einer möglichst realistischen und überraschend auftretenden Totwinkelsituation (Erstkontakt-Situation).

**Hauptfragestellung:** Ist das Informationskonzept wirksam?

- **Teil b – Totwinkelsituationen:** Die Fahrer haben Systemkenntnis und erleben mehrere identisch ablaufende Totwinkelsituationen hintereinander.

**Hauptfragestellung:** Wie verändert sich das Blick- und Fahrverhalten bei bewusster Nutzung des Informationskonzepts?

#### Teil a – Realsituation:

Nach einer zehn-minütigen Eingewöhnungsfahrt startet der erste Versuchsteil – die Realsituation. In diesem Versuchsteil erlebt eine Hälfte der Probanden das Informationskonzept, während die andere Hälfte – die Kontrollgruppe (Baseline) – keine Unterstützung durch das Informationskonzept erhält (Unabhängige Variable = mit/ohne akustische Reflexion, Between-Subjects Design).

Als Versuchsszenario dient eine Autobahn mit drei Fahrstreifen pro Fahrtrichtung, auf der die Fahrer entweder 60 oder 80 km/h unter Beachtung des Rechtsfahrgebotes fahren sollen. Vor der eigentlichen Prüfsituation – der Totwinkelsituation – müssen die Probanden mehrmals langsamere Fahrzeuge überholen und werden auch selbst von schnelleren Fahrzeugen überholt. Somit erleben Fahrer der Gruppe mit Reflexion das Informationskonzept insgesamt sechs Mal vor der Prüfsituation. Diese ist folgendermaßen gestaltet:

Die Fahrer werden angewiesen mit 60 km/h auf dem rechten Fahrstreifen zu fahren. Ein vorausfahrendes Fahrzeug („Führungsfahrzeug“) regelt daraufhin seine Geschwindigkeit automatisch so, dass der Abstand zwischen Führungsfahrzeug und dem Egofahrzeug – dem Probanden – 100 Meter beträgt. Hierdurch ist die Sicht auf den weiteren Straßenverlauf verdeckt. Anschließend wird das Egofahrzeug auf dem mittleren Fahrstreifen von einem roten Fahrzeug überholt (siehe Abb. 6.8 links), in dessen toten Winkel sich das Totwinkelfahrzeug auf dem linken Fahrstreifen „versteckt“. Das Totwinkelfahrzeug kann in dieser Phase noch nicht vom Probanden gesehen werden, da es durch das rote Fahrzeug verdeckt wird. Erst als das rote Fahrzeug das Egofahrzeug passiert, wechselt das Totwinkelfahrzeug auf den mittleren Fahrstreifen und fährt mit konstanter Geschwindigkeit im toten Winkel neben dem Egofahrzeug (Startzeit  $T_0$ : Totwinkelphase). Das Totwinkelfahrzeug passt seine Geschwindigkeit so an das Egofahrzeug an, dass es in einem longitudinalen und lateralen Abstand von ca. 3,0 bzw. 3,5 Metern auf dem mittleren Fahrstreifen nebenher fährt. Dadurch ist nur ein geringer Teil vom Heck des Totwinkelfahrzeugs im Außenspiegel sichtbar (rechtes Hinterrad, siehe Abb. 6.8). Die Fahrer haben somit die Möglichkeit, das Totwinkelfahrzeug durch einen Außenspiegel- oder Schulterblick zu entdecken, jedoch nicht mit Hilfe des Innenspiegels. Nach ca. drei Sekunden wechselt das vorausfahrende Führungsfahrzeug auf den mittleren Fahrstreifen, wodurch ein stehendes

Pannenfahrzeug 140 Meter vor dem Egofahrzeug sichtbar wird. Hierdurch soll der Fahrer motiviert werden, den Fahrstreifen zu wechseln, was nach der Definition aus Kapitel 6.1 den Beginn der Orientierungsphase bedeutet (Startzeit  $T_1$ : Orientierungsphase). Mit Beginn eines Lenkmanövers wird der eigentliche Fahrstreifenwechsel – die Handlungsphase – gestartet (Startzeit  $T_2$ : Handlungsphase). Diese beginnt, sobald der Lenkwinkel größer als  $3^\circ$  ist und für mindestens 0,3 Sekunden oberhalb dieser Schwelle bleibt. Die Handlungsphase ist beendet, sobald der Fahrzeugschwerpunkt die Fahrstreifenmarkierung überschreitet ( $T_3$ : Ende Fahrstreifenwechsel). Sobald die Fahrtrichtung auf dem erreichten Fahrstreifen wieder parallel zur Fahrstreifenmarkierung ist, wird die Simulation eingefroren, damit das räumliche Situationsbewusstsein getestet werden kann.

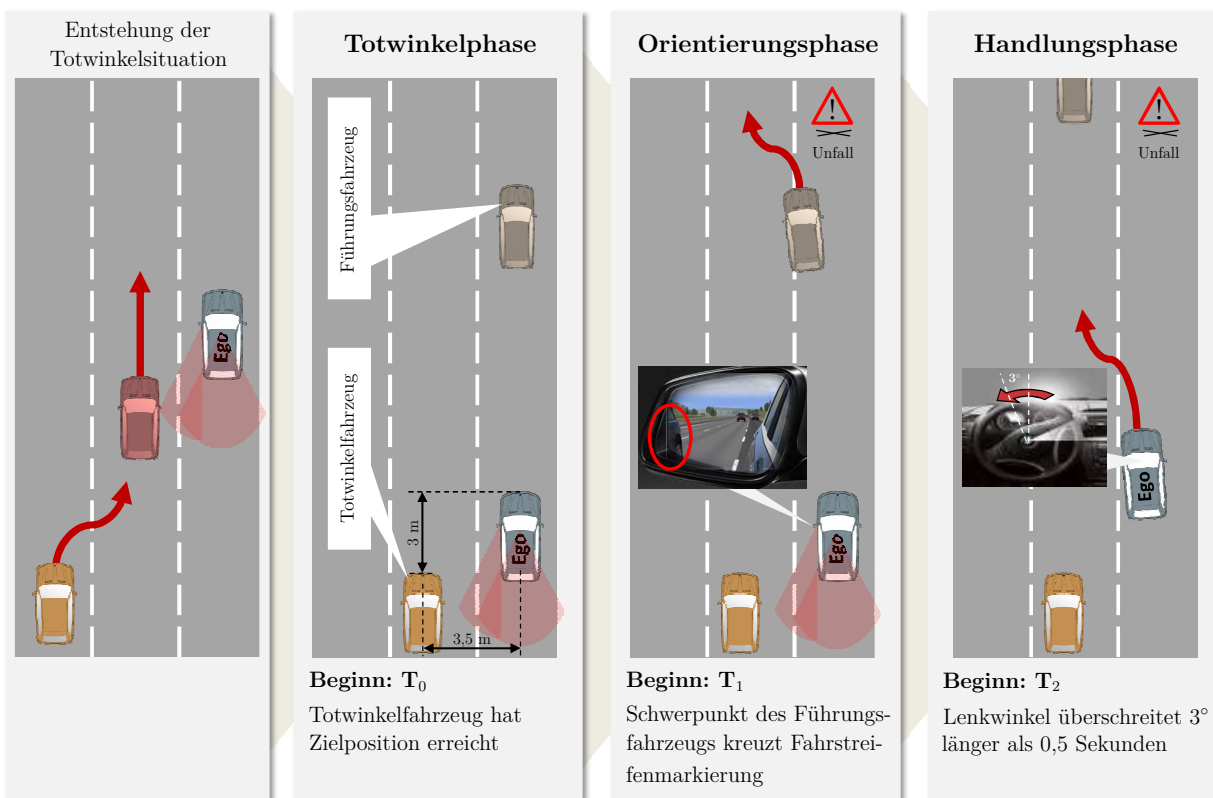


Abbildung 6.8: Entstehung und Ablauf der Totwinkelsituation

Zur Bewertung der Akzeptanz wird den Probanden anschließend ein Demo-Video gezeigt, in dem die zuvor erlebte Realsituation zu sehen ist. Dieses sehen die Probanden vier mal hintereinander, wobei zum Vergleich jedes Mal ein anderes Akustik-Konzept über Kopfhörer dargestellt wird (siehe Abb. 6.9). So können die Probanden das neuartige Informationskonzept mit herkömmlichen akustischen Warnkonzepten vergleichen. Hierunter sind zwei Auditory Icons – ein Motorgeräusch und das Geräusch einer Autohupe [9] [43] – und ein aufdringlicher Warnton – bestehend aus einem gepulsten Sinus-Ton, dessen Frequenz sich in Abhängigkeit vom Abstand zum Totwinkelfahrzeug verändert (vgl. Park Distance Control, PDC [15]). Nach jedem Videodurchlauf bewerten die Probanden das erlebte Akustik-Konzept hinsichtlich der in Kapitel 6.5.2 definierten Eigenschaftspaare (Within-Subjects Design). Der Vorteil dieser Methodik liegt darin, möglichst viele Konzepte in

kurzer Zeit miteinander vergleichen zu können. Alle Akustik-Konzepte im Fahrsimulator zu überprüfen hätte eine zu lange Versuchsdauer zur Folge. Das Demo-Video ist mit Hilfe der Tontechnik-Software Cubase der Firma Steinberg in 5.1 Surround vertont und mit der Software Audiostage der Firma Longcat für eine Kopfhörer-Wiedergabe binauralisiert (siehe Anhang B.4).



**Abbildung 6.9:** Akzeptanzbewertung (links) der vier Akustik-Konzepte mit Hilfe eines Demo-Videos (rechts)

#### **Teil b – Totwinkelsituationen:**

Dieser Versuchsteil enthält zwei Fahrten mit mehreren vergleichbaren Totwinkelsituationen, wobei eine Fahrt mit Informationskonzept und eine ohne Informationskonzept erfolgt. Jeder Proband fährt beide Strecken und erlebt somit die Totwinkelsituationen mit und ohne Informationskonzept (Unabhängige Variable = mit/ohne akustische Reflexion, Within-Subjects Design). Um Reihenfolgeeffekte zwischen der Fahrtnummer und dem Assistenzkonzept zu vermeiden, erlebt eine Hälfte der Fahrer das Informationskonzept in der ersten Fahrt, die andere Hälfte in der zweiten Fahrt.

Die hier entwickelte Untersuchungsmethodik lehnt an das nach ISO/DIS 26022 normierte Verfahren „Lane Change Test“ (LCT) an [119]. Die Probanden werden angewiesen, mit konstanter Geschwindigkeit (60 km/h) auf einer geraden Autobahn mit drei Fahrstreifen zu fahren und bei einer entsprechenden Instruktion den Fahrstreifen zu wechseln. Anders als beim LCT erfolgt die Instruktion nicht über Schilder am Straßenrand, sondern durch eine Anzeige im HUD (schematische Darstellung der drei Fahrstreifen, siehe Abb. 6.10).

Bei einer Fahrstreifenwechsel-Instruktion blinken die gelben Fahrstreifenmarkierungen drei Mal mit einer Frequenz von 1 Hz auf (Anzeigedauer pro Zyklus: 0,5 s). Beim dritten Blinkzyklus erscheint zusätzlich ein roter Pfeil in einem der dargestellten Fahrstreifen (Zeitpunkt  $T_1$ , Start: Orientierungsphase). Der rote Pfeil symbolisiert dem Fahrer den Fahrstreifen, auf den er wechseln soll. Ist der Zielfahrstreifen durch ein anderes Fahrzeug belegt, so sollen sich die Probanden durch Beschleunigen oder Bremsen vor bzw. hinter dem Fahrzeug einordnen. Die Fahrstreifenwechsel sollen dabei stets unmittelbar nach der Instruktion eingeleitet werden. Sobald sich die Fahrer auf dem neuen Fahrstreifen eingeordnet haben, sollen sie wieder konstant mit 60 km/h weiterfahren. Die Art der hier verwendeten Fahrstreifenwechsel-Instruktion hat den Vorteil, dass die Aufmerksamkeit noch vor der angezeigten Instruktion an einen fest definierten Ort in Fahrzeughöhe (HUD-Bereich) und nicht wie beim LCT, an die Umgebung gebunden wird (durch Schilder). Denn blicken die



**Abbildung 6.10:** Beispiel einer Spurwechselsituation (links), HUD-Anzeige für die Fahrstreifenwechsel-Instruktion (mitte, rechts)

Fahrer bereits vor der Fahrstreifen-Instruktion verstärkt auf den Fahrbahnrand, so ist eine höhere Entdeckungswahrscheinlichkeit von Fahrzeugen im toten Winkel zu erwarten.

Während einer Fahrt müssen die Fahrer ca. alle 30 Sekunden einen Fahrstreifenwechsel durchführen. Bei insgesamt 18 Fahrstreifenwechsel (neun nach links und neun nach rechts) dauert eine Fahrt durchschnittlich zehn Minuten. Bei jeder der insgesamt zwei Fahrten sind vier der neun Fahrstreifenwechsel nach links kritisch – also mit einem Fahrzeug im toten Winkel. Diese vier Prüfsituationen treten innerhalb der 18 Fahrstreifenwechsel in unregelmäßigen Abständen auf (Fahrt 1: Fahrstreifenwechsel-Nr. 4, 10, 14, 18 / Fahrt 2: Fahrstreifenwechsel-Nr. 5, 9, 12, 17). Bevor die Probanden mit einer der beiden Fahrten beginnen, fahren sie den Autobahnkurs zur Eingewöhnung ohne andere Verkehrsteilnehmer, um sich mit der Fahrstreifenwechsel-Instruktion im HUD vertraut zu machen.

### 6.5.4 Stichprobe und Ausschlusskriterien

Insgesamt 56 Fahrer umfasst das Probandenkollektiv der Fahrsimulatorstudie. Beide Versuchsteile haben unterschiedliche Ausschlusskriterien und Stichprobenumfänge, die im Folgenden näher beschrieben werden:

#### Teil a – Realsituation:

In diesem Versuchsteil gibt es zwei Kriterien, die erfüllt sein müssen, damit die Prüfsituation in die Auswertung mit aufgenommen wird:

1. Das Totwinkelfahrzeug ist zum Zeitpunkt  $T_1$  (Start: Orientierungsphase) nicht im Innenspiegel, jedoch zum Teil im Außenspiegel sichtbar. Hierfür darf ein longitudinaler Abstand von 2,7 Metern nicht unterschritten werden (siehe Abb. 6.8)
2. Die Probanden fahren in der gesamten Prüfsituation schneller als 40 km/h

Aufgrund des ersten Ausschlusskriteriums müssen 17 Probanden (Gruppe mit Reflexion:  $N = 7$ , Kontrollgruppe:  $N = 10$ ) aus der Auswertung ausgeschlossen werden. Die Abstandsregelung des Totwinkelfahrzeugs auf das Egofahrzeug weist ein zeitverzögertes Antwortverhalten auf. Geht der Fahrer beispielsweise vom Gas, während das Totwinkelfahr-



zeug beschleunigt, reagiert die Regelung aufgrund der Übertragungstrecke (Fahrdynamik, etc.) nicht schnell genug, so dass das Totwinkelfahrzeug kurzzeitig zu weit nach vorne in den Sichtbereich des Fahrers fährt. Hierdurch ist der vordere Teil des Totwinkelfahrzeugs bereits vor der Orientierungsphase im linken Seitenfenster peripher sichtbar. Das zweite Ausschlusskriterium wird nur von einem Fahrer nicht erfüllt, da dieser in der Orientierungsphase beinahe bis zum Stillstand abbremst ( $v < 40$  km/h). Bei drei weiteren Probanden muss der Versuch noch vor der Prüfsituation wegen Übelkeit oder technischer Probleme abgebrochen werden.

Schließlich können  $N = 35$  Probanden für die Auswertung der Realsituation berücksichtigt werden, darunter sind acht Frauen und 27 Männer. Das Alter der Teilnehmer liegt zwischen 21 und 57 Jahren ( $M = 30,2$  Jahre ;  $SD = 7,6$  Jahre). Knapp über die Hälfte der Fahrer haben eine jährliche Fahrleistung von unter 10.000 km. 25 % der Probanden geben an, weniger als 20.000 km und 20 % mehr als 20.000 km pro Jahr zu fahren.

#### **Teil b – Totwinkelsituationen:**

Da in diesem Versuchsteil keine überraschend auftretenden Totwinkelsituationen vorkommen, sind keine situationsbedingten Ausschlüsse zu erwarten. Aus diesem Grund ist es nicht erforderlich, dass alle 56 Probanden den zweiten Versuchsteil fahren. Bubb [25] schlägt für Versuche mit zwei verschiedenen Testbedingungen Stichprobengrößen von 30 bis 40 Probanden vor. Daher fahren im Anschluss an den Teil a nur die ersten 40 der insgesamt 56 Fahrer den zweiten Versuchsteil. Lediglich wegen Übelkeit und eines technischen Problems müssen zwei Probanden aus der Auswertung herausgenommen werden. Somit geht eine Stichprobe bestehend aus 12 Frauen und 26 Männern in die Auswertung mit ein. Das Alter der Teilnehmer liegt zwischen 21 und 55 Jahren ( $M = 29,8$  Jahre;  $SD = 8,8$  Jahre). Knapp über die Hälfte der Fahrer hat eine jährliche Fahrleistung von über 10.000 km. 18 % der Fahrer geben an, weniger als 5.000 km und 25 % zwischen 5.000 und 10.000 km pro Jahr zu fahren.

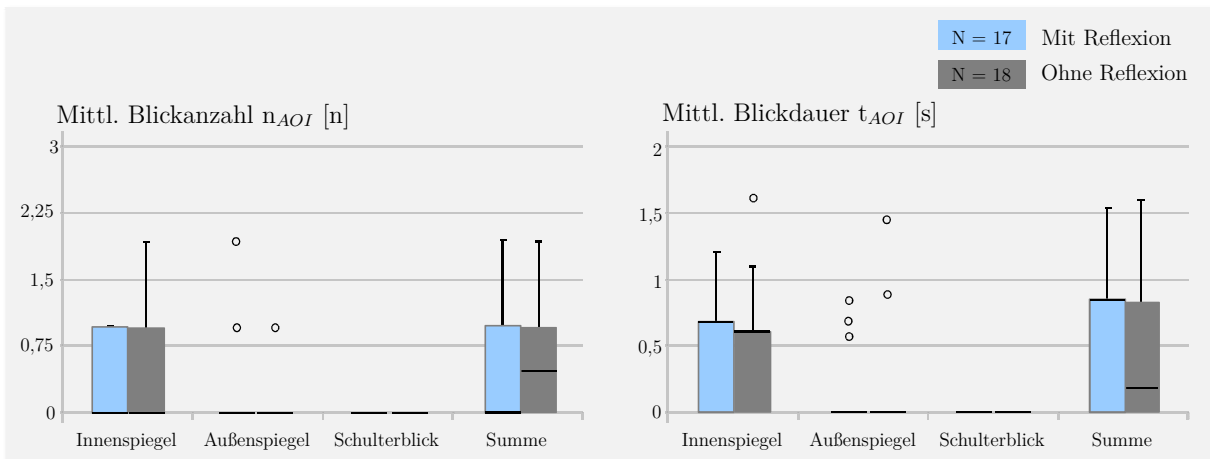
### **6.5.5 Ergebnisse Teil a – Realsituation**

Im Folgenden werden die Fragestellungen und Hypothesen aus Kapitel 6.3 untersucht bzw. geprüft. Hierfür wird das Blick- und Fahrverhalten beider Gruppen (mit und ohne akustische Reflexion) in den einzelnen Handlungsphasen miteinander verglichen. Die statistische Auswertung erfolgt unter Verwendung der Statistik-Software SPSS. Sofern die gemessenen Daten die Voraussetzung für parametrische Analyseverfahren nicht erfüllen, werden entsprechende nicht-parametrische Tests verwendet. Bei Mehrfachvergleichen wird das Signifikanzniveau entsprechend einer Bonferroni-Korrektur herabgesetzt.

#### **Totwinkelphase ( $T_0$ bis $T_1$ ):**

Wie in Abbildung 6.11 zu sehen ist, zeigt sowohl die Gruppe mit Reflexion, als auch die Kontrollgruppe ein beinahe identisches Blickverhalten in der Totwinkelphase. Zum Vergleich der Mittelwerte der Blickanzahl und -dauer in den entsprechenden AOIs werden Mann-Whitney U-Tests gerechnet. Diese ergeben jedoch keine signifikanten Unterschiede,

was entweder auf zu geringe Unterschiede der Mittelwerte oder eine zu geringe Teststärke zurückgeführt werden kann. Um nachzuweisen, dass keine Unterschiede bestehen, wird zusätzlich mit Hilfe des Bootstrap-Verfahrens das 95 % Konfidenzintervall für die Summe aller Absicherungsblicke berechnet.



**Abbildung 6.11:** Boxplots der Blickanzahl  $n_{AOI}$  und Blickdauer  $t_{AOI}$  in der Totwinkelphase

		Innenspiegel		Außenspiegel		Schulterblick		Summe	
		M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
$n_{AOI}$	Mit Reflex.	0,41	0,51	0,24	0,56	0,00	0,00	0,65	0,86
	Ohne Refl.	0,50	0,62	0,17	0,38	0,00	0,00	0,67	0,77
$t_{AOI}$	Mit Reflex.	0,33	0,44	0,12	0,28	0,00	0,00	0,45	0,57
	Ohne Refl.	0,34	0,47	0,13	0,39	0,00	0,00	0,47	0,59

**Tabelle 6.1:** Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) der Blickanzahl  $n_{AOI}$  [n] und Blickdauer  $t_{AOI}$  [s] in der Totwinkelphase

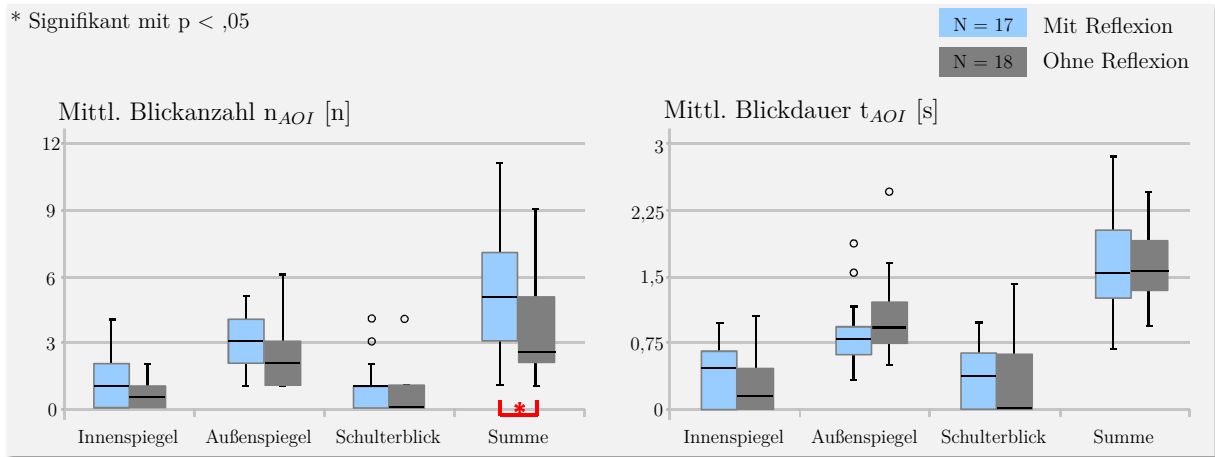
Dies ergibt ein Intervall von  $-0,48$  bis  $+0,41$  Blicken. Dies bedeutet, dass weniger als ein Blick Unterschied in der Summe aller Absicherungsblicke auftreten kann, was inhaltlich vernachlässigbar ist. Erst ab ca. einem Blick kann von einem Einfluss des Informationskonzepts gesprochen werden, weshalb Hypothese 1c bestätigt werden kann.

Die Analyse des Fahrverhaltens zeigt, dass das Informationskonzept in der Totwinkelphase keinen Effekt auf die Längs- und Querführung hat. Die Geschwindigkeit beträgt konstant ca. 60 km/h, und die durchschnittliche Spurposition MLP (Gruppe mit Reflexion:  $M = 1,72$  m ;  $SD = 0,12$  m, Kontrollgruppe:  $M = 1,75$  m ;  $SD = 0,16$  m) und Standardabweichung der Spurposition SDLP sind bei beiden Gruppen nahezu identisch (Gruppe mit Reflexion:  $M = 0,12$  m ;  $SD = 0,05$  m, Kontrollgruppe:  $M = 0,11$  m ;  $SD = 0,08$  m).

**Orientierungsphase ( $T_1$  bis  $T_2$ ):**

Die Analyse des Blickverhaltens zeigt, dass die Fahrer beider Gruppen in der Orientierungsphase mindestens einmal in den Außenspiegel blicken. In den Innenspiegel blicken 20

(Gruppe mit Reflexion:  $N = 11$ , Kontrollgruppe:  $N = 9$ ), und einen Schulterblick machen 16 (Gruppe mit Reflexion:  $N = 10$ , Kontrollgruppe:  $N = 6$ ) der insgesamt 35 Fahrer (siehe Abb. 6.12). Mittels Mann-Whitney U-Tests werden die Mittelwerte der Blickanzahl und -dauer der beiden Gruppen in den entsprechenden AOIs miteinander verglichen.



**Abbildung 6.12:** Boxplots der Blickanzahl  $n_{AOI}$  und Blickdauer  $t_{AOI}$  in der Orientierungsphase

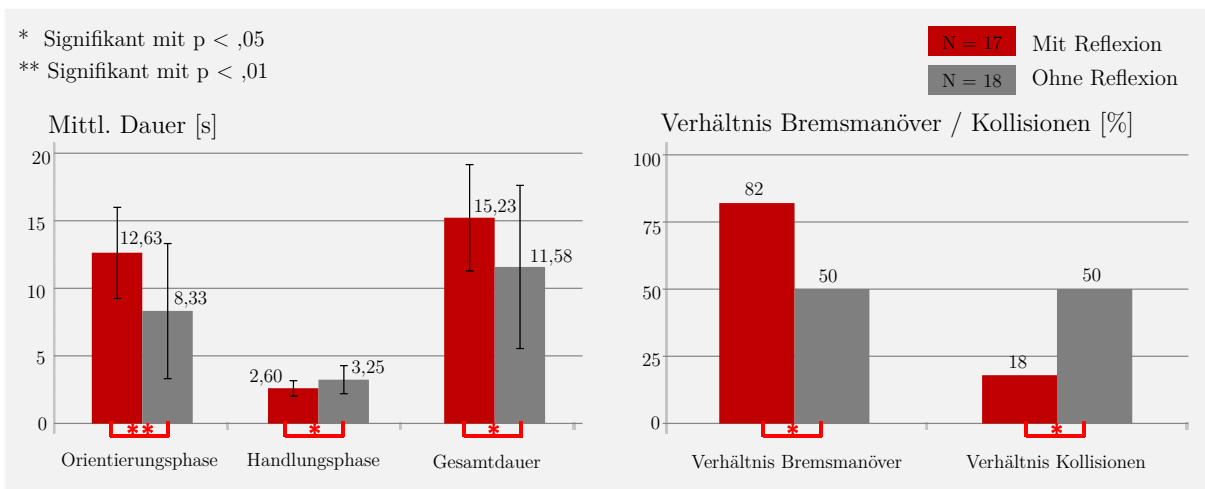
		Innenspiegel		Außenspiegel		Schulterblick		Summe	
		M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
$n_{AOI}$	Mit Reflex.	1,29	1,31	2,82	1,33	0,94	1,14	5,06	2,56
	Ohne Refl.	0,61	0,70	2,33	1,57	0,50	0,99	3,44	2,36
$t_{AOI}$	Mit Reflex.	0,40	0,36	0,87	0,38	0,35	0,35	1,62	0,59
	Ohne Refl.	0,30	0,36	1,04	0,46	0,25	0,43	1,60	0,43

**Tabelle 6.2:** Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) der Variablen Blickanzahl  $n_{AOI}$  [n] und Blickdauer  $t_{AOI}$  [s] in der Orientierungsphase

Die Analyse der Blickanzahl zeigt, dass sich die Mittelwerte der Summe aller Absicherungsblicke signifikant unterscheiden ( $U = 93$ ,  $p = ,025$ ; 1-seitig). So blicken die Fahrer der Gruppe mit Reflexion ( $M = 5,06$ ;  $SD = 2,56$ ) um einen Blick (ca. 1,5 Mal) öfter nach hinten oder zur Seite als Fahrer der Kontrollgruppe ( $M = 3,44$ ;  $SD = 2,36$ ). Hypothese 1a kann somit bestätigt werden. Diese Tendenz zeigt sich auch in den einzelnen AOIs (Innenspiegel, Außenspiegel und Schulterblick), wobei die Unterschiede nicht signifikant sind. Darüber hinaus blicken die Fahrer der Gruppe mit Reflexion durchschnittlich länger in den Außenspiegel oder per Schulterblick nach hinten als Fahrer der Kontrollgruppe (siehe Tab. 6.2). Jedoch ist dieser Unterschied nicht signifikant.

Die Analyse des Fahrverhaltens zeigt, dass 82 % der Fahrer der Gruppe mit Reflexion die Bremse betätigen, bevor sie den Fahrstreifenwechsel einleiten (Gruppe mit Reflexion:  $n_{Längsregulation} = 14$ , Kontrollgruppe:  $n_{Längsregulation} = 9$ , siehe Verhältnis Bremsmanöver in Abb. 6.13 rechts). Bei Fahrern der Kontrollgruppe sind es nur 50 % ( $\chi^2(1, N = 35) = 4,062$ ,  $p = ,047$ ; 1-seitig). Darüber hinaus lassen sich die Fahrer der Gruppe mit Reflexion

mehr Zeit, bevor sie das Fahrmanöver für einen Fahrstreifenwechsel einleiten. So beträgt die Dauer der Orientierungsphase bei diesen Fahrern im Durchschnitt 12,63 Sekunden (SD = 3,36 s) und bei Fahrern der Kontrollgruppe 8,33 Sekunden (SD = 4,99 s). Eine Analyse der beiden Mittelwerte mit Hilfe eines t-Tests ergibt einen signifikanten Unterschied ( $t(33) = 2,97, p < ,01$ ; 1-seitig). Die Hypothesen 2a und 2b können daher bestätigt werden. Bei der Querführung unterscheiden sich die mittlere Spurposition MLP (Gruppe mit Reflexion:  $M = 1,78$  m;  $SD = 0,20$  m, Kontrollgruppe:  $M = 1,76$  m;  $SD = 0,16$  m) und Standardabweichung der lateralen Spurposition SDLP (Gruppe mit Reflexion:  $M = 0,10$  m;  $SD = 0,07$  m, Kontrollgruppe:  $M = 0,08$  m;  $SD = 0,06$  m) um ca. 2 cm, was einem vernachlässigbar kleinen Unterschied entspricht.

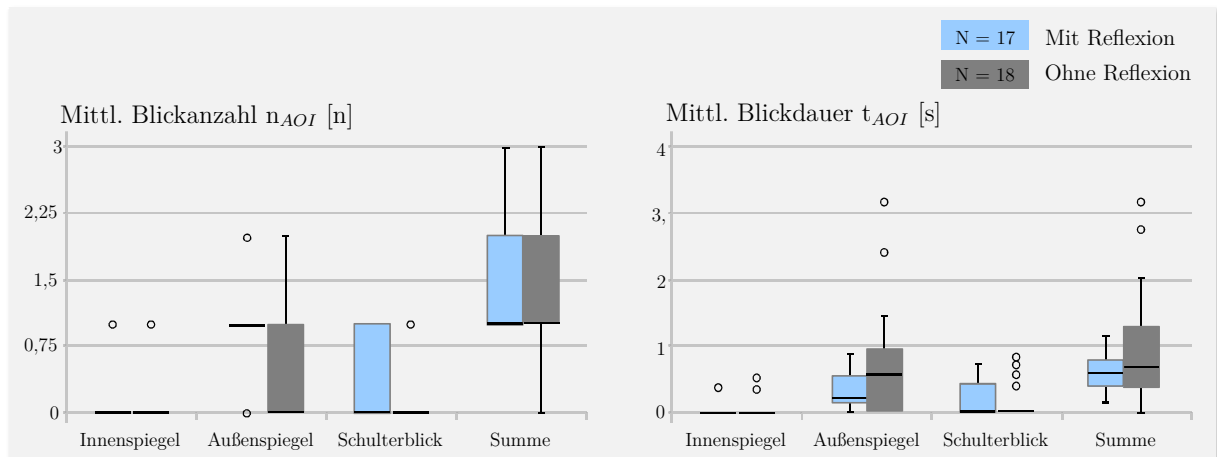


**Abbildung 6.13:** Mittlere Dauer der Fahrstreifenwechsel-Phasen (links), Verhältnis der Bremsmanöver und Kollisionen (rechts) in der Handlungsphase

### Handlungsphase ( $T_2$ bis $T_3$ ):

In der Handlungsphase gibt es keine signifikanten Unterschiede in den Blickdaten. Die Fahrer sichern während des Fahrstreifenwechsels das eingeleitete Fahrmanöver überwiegend durch Außenspiegelblicke ab. Tendenziell blicken die Fahrer der Gruppe mit Reflexion ( $M = 1,04$  s;  $SD = 0,46$  s) im Durchschnitt um ca. 0,17 Sekunden länger in den Außenspiegel als Fahrer der Kontrollgruppe ( $M = 0,87$  s;  $SD = 0,38$  s, siehe Abb. 6.14), jedoch erreicht dieser Unterschied nicht das Signifikanzniveau.

Die Analyse des Fahrverhaltens zeigt, dass Fahrer der Gruppe mit Reflexion ( $M = 2,60$  s;  $SD = 0,57$  s) den Fahrstreifenwechsel schneller als Fahrer der Kontrollgruppe ( $M = 3,25$  s;  $SD = 1,04$  s) durchführen. Ein t-Test ergibt einen signifikanten Unterschied zwischen den Mittelwerten der Dauer der Handlungsphase ( $t(33) = -2,31, p = ,014$ ; 1-seitig). Bei 18 % der Fahrer der Gruppe mit Reflexion kommt es beim Fahrstreifenwechsel zu einer Kollision, bei Fahrern der Kontrollgruppe sind es 50 % (Gruppe mit Reflexion:  $n_{Kollision} = 3$ , Kontrollgruppe:  $n_{Kollision} = 9$ , siehe Abb. 6.13). Mit Hilfe eines  $\chi^2$ -Tests kann dieser Unterschied und somit die Hypothese 2c statistisch bestätigt werden ( $\chi^2(1, N = 35) = 4,062, p = ,047$ ; 1-seitig). In Abbildung 6.13 (rechts) ist außerdem zu erkennen, dass die Fahrer, die kein Bremsmanöver einleiten, mit dem Totwinkelfahrzeug kollidieren.



**Abbildung 6.14:** Boxplots der Blickanzahl  $n_{AOI}$  und Blickdauer  $t_{AOI}$  in der Handlungsphase

		Innenspiegel		Außenspiegel		Schulterblick		Summe	
		M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
$n_{AOI}$	Mit Reflex.	0,06	0,24	0,82	0,53	0,47	0,51	1,35	0,60
	Ohne Refl.	0,17	0,38	0,72	0,67	0,22	0,43	1,11	0,83
$t_{AOI}$	Mit Reflex.	0,22	0,09	0,32	0,30	0,23	0,26	0,57	0,30
	Ohne Refl.	0,06	0,15	0,71	0,88	0,13	0,27	0,91	0,92

**Tabelle 6.3:** Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) der Variablen Blickanzahl  $n_{AOI}$  [n] und Blickdauer  $t_{AOI}$  [s] in der Handlungsphase

### Blick- und Fahrverhalten in Abhängigkeit einer Kollision:

In Tabelle 6.4 wird gezeigt, dass Fahrer, die einen Schulterblick machen, keine Kollision mit dem Totwinkelfahrzeug verursachen (mit Ausnahme eines Fahrers aus der Kontrollgruppe). Bei Fahrern, die nur den Außenspiegel zur Absicherung nutzen, ist der Einfluss des Reflexionskonzepts auf die Entdeckungswahrscheinlichkeit des Totwinkelfahrzeug am deutlichsten erkennbar. Denn sieben Fahrer der Kontrollgruppe machen keinen Schulterblick, dafür jedoch mehrere Außenspiegelblicke, und kollidieren trotzdem mit dem Totwinkelfahrzeug. Bei der Gruppe mit Reflexion kommt dies nur bei einem Fahrer vor.

Bezüglich des Fahrverhaltens wird der Verlauf der lateralen Spurposition (LP) [m] über den gesamten Vorgang des Fahrstreifenwechsels, also vom Beginn der Orientierungsphase  $T_1$  bis zum Ende der Handlungsphase  $T_3$ , analysiert. Um die zeitlich unterschiedlich langen Spurverläufe miteinander vergleichen zu können, wird der Zeitvektor der Messdaten in den sogenannten „Fahrstreifenwechsel-Fortschrittsgrad“ (FWF) [%] transformiert. D. h. zu Beginn der Orientierungsphase  $T_1$  beträgt der Fahrstreifenwechsel-Fortschrittsgrad 0 % und gegen Ende der Handlungsphase  $T_3$  100 %. Dazwischen liegende Messwerte sind im Verhältnis zur gesamten Dauer des Fahrstreifenwechsels  $t_{Gesamt}$  des entsprechenden Fahrers mit folgender Gleichung (6.1) umgerechnet ( $LP_1 \dots LP_n$  ist das Messdaten-Array der lateralen Spurposition,  $t_1 \dots t_n$  ist der zugehörige Zeitstempel):

Mit Informationskonzept			
	Schulterblick	kein Schulterblick	
		Anzahl Außen- spiegelblicke > 1	Anzahl Außen- spiegelblicke = 1
Kollision	0	1	2
Keine Kollision	10	3	1
Ohne Informationskonzept			
	Schulterblick	kein Schulterblick	
		Anzahl Außen- spiegelblicke > 1	Anzahl Außen- spiegelblicke = 1
Kollision	1	7	1
Keine Kollision	5	4	0

**Tabelle 6.4:** Verteilung der Absicherungsstrategien Abhängigkeit einer Kollision und einer Systemunterstützung

$$\underbrace{\begin{pmatrix} LP_1 & \dots & LP_n \\ FWF_1 & \dots & FWF_n \end{pmatrix}}_{\text{Messdaten mit Fortschrittsgrad}}_{VP} = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{100}{t_{Gesamt}} \end{pmatrix}}_{\text{Transformationsmatrix}}_{VP} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} LP_1 & \dots & LP_n \\ t_1 & \dots & t_n \end{pmatrix}}_{\text{Messdaten mit Zeitstempel}}_{VP} \quad (6.1)$$

In Abbildung 6.15 sind die transformierten Verläufe der lateralen Spurposition aller Probanden der Gruppe mit Reflexion (oben), der Kontrollgruppe (Mitte) und die gemittelten Verläufe beider Gruppen (unten) dargestellt. So ist zu erkennen, dass die Fahrer der Gruppe mit Reflexion den Fahrstreifenwechsel im Verhältnis später, dafür aber in einem steileren Winkel zur Fahrstreifenmarkierung durchführen. Hierbei entstehen keine Kollisionen mit dem Fahrzeug im toten Winkel. Fahrer der Kontrollgruppe leiten das Fahrmanöver für einen Fahrstreifenwechsel im Verhältnis früher ein, nähern sich dabei jedoch in einem flacheren Winkel der linken Fahrstreifenmarkierung an. Hierdurch kommt es öfter zu einer Kollision mit dem Totwinkelfahrzeug.

**Subjektive Bewertung:**

Mittels einfaktorieller Varianzanalyse kann im Bezug auf die Akzeptanzbewertung gezeigt werden, dass sich die Mittelwerte der Akustik-Konzepte bei den Eigenschaftspaaren natürlich - synthetisch (F[3,16] = 17,70, p < ,01), unaufdringlich - aufdringlich (F[3,16] = 53,75, p < ,01) und angenehm - störend (F[3,16] = 50,39, p < ,01) signifikant unterscheiden (siehe Abb. 6.16). Bei den Mittelwerten des Eigenschaftspaares nützlich - unnützlich liegen keine signifikanten Unterschiede vor. Weitere Post-hoc-Tests zeigen, dass die Reflexion signifikant natürlicher, unaufdringlicher und angenehmer als der Sinus-Ton (bei allen Eigenschaftspaaren p < ,01) und die Autohupe (bei allen Eigenschaftspaaren p ≤ ,01) bewertet wird. Darüber hinaus wird die Reflexion signifikant unaufdringlicher und natürlicher als das Motorgeräusch bewertet (bei beiden Eigenschaftspaaren p < ,01). Die Hypothese 3c – das Informationskonzept (Reflexion) wird als angenehmer und weniger störend empfunden – kann somit bestätigt werden.

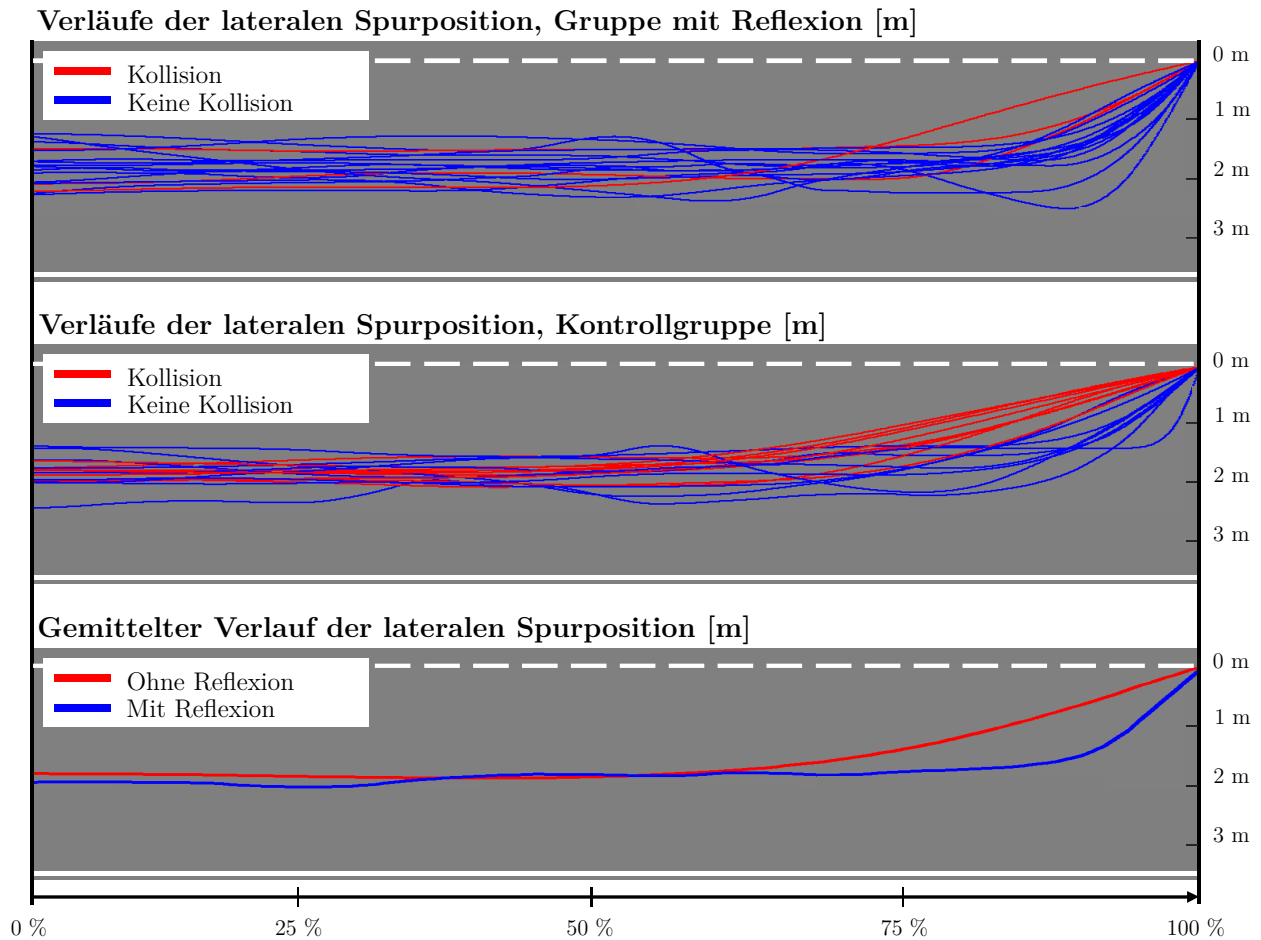


Abbildung 6.15: Verläufe der lateralen Spurposition (LP) in Abhängigkeit des Fahrstreifenwechsel-Fortschrittsgrades (FWF) [%]

Die Analyse des räumlichen Situationsbewusstseins zeigt, dass 54,7 % der Fahrer der Gruppe mit Reflexion das Totwinkelfahrzeug auf dem Fragebogen einzeichnen, bei der Kontrollgruppe sind es hingegen 38,8 % der Fahrer. Da dieser Unterschied nicht signifikant wird ( $\chi^2(1, N = 35) = 2,33, p = ,117$ ; 1-seitig), kann die Hypothese 3b nicht bestätigt werden.

	-2	-1	0	1	2		Reflexion ♦ M / SD	Motorgeräusch ■ M / SD	Sinus-Ton ▲ M / SD	Autohupe ○ M / SD	Signifikanz
natürlich		♦	■	▲	○	synthetisch	-1,29 / 0,85	+0,24 / 1,44	+1,41 / 0,94	+0,35 / 1,12	$p < ,01^*$
unaufdringlich		♦	■	▲	○	aufdringlich	-1,41 / 0,71	-0,29 / 1,16	+1,29 / 1,16	+1,65 / 0,79	$p < ,01^*$
angenehm		♦	■	▲	○	störend	-1,00 / 0,86	-0,35 / 1,12	+1,35 / 0,79	+1,76 / 0,44	$p < ,01^*$
nützlich		♦	■	▲	○	unnützlich	-0,71 / 1,11	-0,65 / 1,17	-0,88 / 0,93	+0,01 / 1,54	$p = ,10$

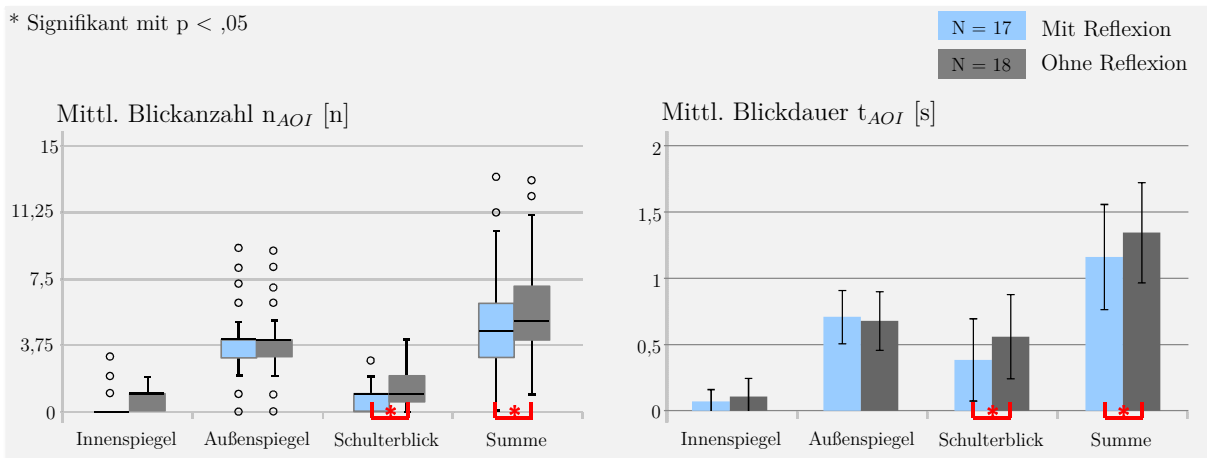
Abbildung 6.16: Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) der Akzeptanzbewertung der verschiedenen Akustik-Konzepte (\*  $\hat{=}$  signifikanter Unterschied)

### 6.5.6 Ergebnisse Teil b – Totwinkelsituationen

Nachdem nun der Einfluss des Informationskonzepts auf das Blick- und Fahrverhalten bei Fahrern ohne Systemkenntnis beschrieben wurde, wird im Folgenden berichtet, wie Fahrer ihr Blick- und Fahrverhalten bei bewusster Nutzung des Informationskonzepts verändern.

#### Blick- und Fahrverhalten mit Systemkenntnis:

Grundsätzlich machen alle 38 Fahrer mindestens einen Absicherungsblick (per Außenspiegel- oder Schulterblick) bevor sie das Fahrmanöver für einen Fahrstreifenwechsel einleiten.



**Abbildung 6.17:** Boxplots der Blickanzahl  $n_{AOI}$  (links), Mittelwerte der Blickdauer  $t_{AOI}$  (links) gemittelt über alle vier Prüfsituationen

		Innenspiegel		Außenspiegel		Schulterblick		Summe	
		M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
$n_{AOI}$	Mit Reflex.	0,23	0,50	3,64	1,55	0,82	0,85	4,69	1,94
	Ohne Refl.	0,34	0,65	3,77	1,55	1,19	0,95	5,30	2,13
$t_{AOI}$	Mit Reflex.	0,07	0,17	0,70	0,29	0,40	0,40	1,18	0,53
	Ohne Refl.	0,11	0,21	0,68	0,30	0,57	0,42	1,36	0,53

**Tabelle 6.5:** Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) der Variablen Blickanzahl  $n_{AOI}$  [n] und Blickdauer  $t_{AOI}$  [s] gemittelt über alle vier Prüfsituationen

Die Analyse des Blickverhaltens über alle vier Prüfsituationen gemittelt zeigt (siehe Abb. 6.17), dass bei Fahrstreifenwechsel, bei denen die Fahrer keine Reflexion erhalten, mehr Schulterblicke gemacht werden und in Summe öfter nach hinten oder zur Seite geblickt wird (Schulterblick:  $M = 1,18$  ;  $SD = 76$ , Summe Absicherungsblicke:  $M = 5,30$  ;  $SD = 1,69$ ) als bei Fahrstreifenwechsel, bei denen die Fahrer eine Reflexion erhalten (Schulterblick:  $M = 0,81$  ;  $SD = 70$ , Summe Absicherungsblicke:  $M = 4,70$  ;  $SD = 1,57$ ). Die Analyse der Mittelwerte mit Hilfe eines Wilcoxon-Tests ergibt einen signifikanten Unterschied (Schulterblicke:  $Z = -3,945$ ,  $p < ,01$ , Summe aller Absicherungsblicke:  $Z = -2,897$ ,



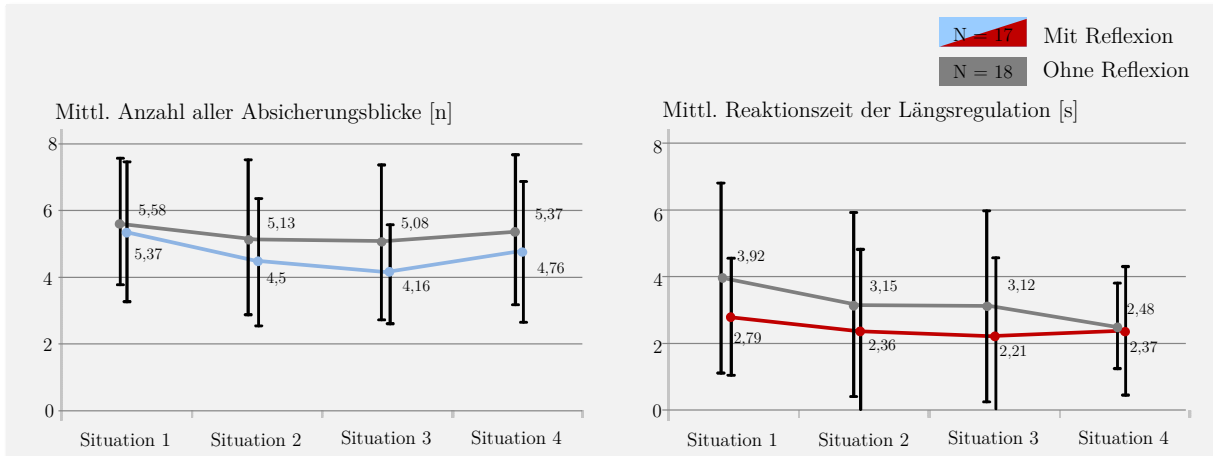
$p < ,01$ ), weshalb die Hypothese 1b bestätigt werden kann. Darüber hinaus dauern bei Fahrstreifenwechsel, bei denen die Fahrer keine Reflexion erhalten, die Schulterblicke sowie die Summe aller Absicherungsblicke im Schnitt länger (Schulterblicke:  $M = 0,57$  s ;  $SD = 0,42$  s, Summe Absicherungsblicke:  $M = 1,36$  s ;  $SD = 0,53$  s) als bei Fahrstreifenwechsel, bei denen die Fahrer eine Reflexion erhalten (Schulterblicke:  $M = 0,40$  s ;  $SD = 0,40$  s, Summe Absicherungsblicke:  $M = 1,18$  s ;  $SD = 0,53$  s). Ein t-Test ergibt einen signifikanten Unterschied dieser Mittelwerte (Schulterblicke:  $t(37) = -5,040$ ,  $p < ,01$ ; Summe aller Absicherungsblicke:  $t(37) = -3,546$ ,  $p < ,01$ ).

Die Analyse des Fahrverhaltens zeigt, dass alle Fahrer den Fahrstreifen wechseln, ohne eine Kollision mit dem Totwinkelfahrzeug zu verursachen. Fahrer, die das Reflexionskonzept erleben, leiten das Fahrmanöver für einen Fahrstreifenwechsel unmittelbarer ein. So ist die Reaktionszeit bis zur ersten Änderung der Längsregulation  $t_{Längsregulation}$  bei Fahrern, die eine Reflexion erhalten ( $M = 2,44$  s ;  $SD = 1,72$  s) im Schnitt um 0,73 Sekunden kürzer ( $Z = -3,162$ ,  $p < ,01$ ) als bei Fahrern, die keine Unterstützung erhalten ( $M = 3,17$  s ;  $SD = 1,77$  s). Aufgrund dieses signifikanten Unterschieds kann Hypothese 2d bestätigt werden. Auf die gesamte Dauer des Fahrstreifenwechsels hat das Reflexionskonzept – gemittelt über alle vier Prüfsituationen – keinen Einfluss.

#### **Lerneffekte:**

Der Lerneffekt beschreibt, wie sich das Blick- und Fahrverhalten in den einzelnen Prüfsituationen durch das Informationskonzept verändern. Hierfür werden die Summe aller Absicherungsblicke  $n_{AOI}$  und die Reaktionszeit bis zur ersten Änderung der Längsregulation  $t_{Längsregulation}$  in den vier Prüfsituationen jeweils mit und ohne Reflexion miteinander verglichen. Mittels einer zweifaktoriellen Varianzanalyse werden die Mittelwertunterschiede der Blickanzahl und der Reaktionszeit  $t_{Längsregulation}$  in den einzelnen Prüfsituationen miteinander verglichen. Der Zwischensubjektfaktor ist der Unterstützungsgrad (mit oder ohne Reflexion) und der Innersubjektfaktor der Messzeitpunkt (erste bis vierte Prüfsituation). Ausschlaggebend für den Lerneffekt ist jedoch der Innersubjektfaktor, dessen Analyse keine signifikanten Unterschiede ergibt. Darüber hinaus ergeben sich keine signifikanten Interaktionseffekte zwischen den Faktoren „Unterstützungsgrad“ (mit/ohne Reflexion) und „Messzeitpunkt“ (Nummer der Prüfsituation). Somit können keine signifikanten Lerneffekte durch das Informationskonzept in den vier Prüfsituationen festgestellt werden.

Wie in Abbildung 6.18 (links) jedoch zu erkennen ist, verringert sich die mittlere Anzahl aller Absicherungsblicke mit und ohne Reflexion von der ersten bis zur vierten Prüfsituation. Tendenziell ist somit ein möglicher Lerneffekt bei Fahrern, die eine Reflexion erhalten, stärker als bei Fahrern ohne Reflexion, da die Anzahl der Absicherungsblicke bei Fahrstreifenwechsel mit Reflexionskonzept stärker zurückgehen als bei Fahrstreifenwechsel ohne Unterstützung. Dies ist zumindest bis zur dritten Prüfsituation zu beobachten, in der vierten nimmt die Blickanzahl unter beiden Bedingungen (mit und ohne Reflexion) wieder zu. Bei einer deskriptiven Analyse der mittleren Reaktionszeit bis zur ersten Änderung der Längsregulation  $t_{Längsregulation}$  fällt auf, dass Fahrer mit Reflexion in jeder Prüfsituationen schneller reagieren als Fahrer, die keine Reflexion erhalten. Bei Fahrern mit Reflexion verändert sich die Reaktionszeit  $t_{Längsregulation}$  über die einzelnen Prüfsituationen nur geringfügig, weshalb hier keine Lerneffekte vorliegen. Die Fahrer benötigen



**Abbildung 6.18:** Änderung der Summe aller Absicherungsblicke und der Dauer des Fahrstreifenwechsels über die vier Prüfsituationen

in allen vier Prüfsituationen in etwa die gleiche Zeit bis sie das Fahrmanöver für den Fahrstreifenwechsel durch Beschleunigen oder Abbremsen einleiten (ca. 2,27 s bis 2,79 s). Bei Fahrern, die keine Reflexion erhalten, nimmt dagegen die Reaktionszeit auf die Fahrstreifenwechsel-Instruktion mit jeder Prüfsituation zunehmend ab und nähert sich in der vierten Prüfsituation dem Reaktionszeitniveau der Fahrer mit Reflexion an.

## 6.6 Zusammenfassung und Diskussion

Die akustische Darstellung von Fahrzeugen außerhalb des Sichtbereichs hat großes Potential für Assistenzsysteme der Querführung. Die Fahrer erhalten bereits in der frühen Phase einer kritischen Verkehrssituation die Information über ein Fahrzeug im toten Winkel, weshalb sie die Situation selbstständig auflösen können und erst gar nicht in eine akute Notsituation geraten. Durch die räumlich-gerichtete Reflexion (Pegelverstärkung und Kammfilterung) des eigenen Fahrgeräuschs erhalten die Fahrer eine natürlich klingende Darstellung von Fahrzeugen im toten Winkel, was tendenziell zu einem verbesserten räumlichen Situationsbewusstsein und somit zu weniger Unfällen führt. Die entscheidenden Gestaltungsaspekte sind hier eine Erhöhung der Reizintensität (Schalldruckpegel) und der Richtungsspezifität (Richtung der Reflexion). Obwohl akustische Rückmeldungen von FAS in der Literatur häufig als störend beschrieben werden, bewerten die Fahrer das hier entwickelte Informationskonzept als natürlich und angenehm. Bezüglich der Akzeptanzbewertung zeigt das Prinzip der akustischen Reflexion einen deutlichen Vorteil gegenüber aufdringlichen Warntönen (Sinus-Ton) oder Audiotoy Icons (Motorgeräusch und Autohupe). Die akustische Reflexion wird als natürlicher, weniger störend und weniger aufdringlich empfunden. Dies deckt sich auch mit dem Blickverhalten in der Totwinkelphase der Real-situation. Die akustische Reflexion ist durch die geringe Änderung des Schalldruckpegels und der Klangfarbe so dezent, dass die Fahrer nicht visuell abgelenkt werden, sofern sie keine Absicht haben den Fahrstreifen zu wechseln. Wollen die Fahrer dagegen den Fahr-

streifen wechseln, so ruft das Informationskonzept je nach Systemkenntnis der Fahrer ein unterschiedliches Blick- und Fahrverhalten hervor.

Erleben die Fahrer das akustische Informationskonzept im Erstkontakt – also ohne Systemkenntnis –, so blicken sie häufiger nach hinten oder zur Seite, lassen sich bei der Situationsüberwachung mehr Zeit und kollidieren seltener mit dem Totwinkelfahrzeug als Fahrer der Kontrollgruppe (keine Reflexion). Eine häufige Ursache für eine Kollision mit dem Totwinkelfahrzeug ist ein ausbleibender Schulterblick, was hauptsächlich bei Fahrern der Kontrollgruppe vorkommt. Außerdem kollidieren überwiegend Fahrer der Kontrollgruppe, die nur den Außenspiegel zur Absicherung des rückwärtigen Verkehrs nutzen, mit dem Totwinkelfahrzeug, obwohl sie zuvor mehrere Male in den Außenspiegel geblickt haben. Da das Totwinkelfahrzeug im Außenspiegel sichtbar ist (siehe Abb. 6.8) und die Fahrer dennoch eine Kollision verursachen, kann hier von einem Look-but-fail-to-see Phänomen ausgegangen werden (siehe Kap. 2.2.3). Bei Fahrern mit akustischer Reflexion ist dieses Phänomen nur einmal zu beobachten. Folglich erhöht das Informationskonzept die Entdeckungswahrscheinlichkeit von Fahrzeugen im toten Winkel und trägt so zur Vermeidung eines Informationsfehlers bei. Somit ist in dieser Fahrstudie die Wirksamkeit räumlich-gerichteter Schallreflexionen für Assistenzsysteme der Querführung nachgewiesen. Eine signifikante Verbesserung des Situationsbewusstseins aufgrund des akustischen Informationskonzepts kann jedoch mit der hier vorgestellten Methode nicht gezeigt werden, obwohl tendenziell Unterschiede zu erkennen sind. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass Fahrer, die richtig gehandelt haben und dennoch nicht das Totwinkelfahrzeug bei der anschließenden subjektiven Bewertung einzeichnen, entweder die Aufgabe nicht verstehen oder die Situation wieder vergessen haben.

Erleben die Fahrer das Informationskonzept dagegen zum wiederholten Male – also mit Systemkenntnis –, so lässt sich ein anderes Blick- und Fahrverhalten beim Fahrstreifenwechsel beobachten. Die Fahrer nutzen die zusätzliche Information zur räumlichen Orientierung, reduzieren gegenüber der Baseline (keine Reflexion) ihre Absicherungsaktivitäten, kollidieren jedoch nie mit dem Totwinkelfahrzeug. Hierdurch kann dem vorausfahrenden Verkehr mehr Aufmerksamkeit gewidmet werden. Bestimmte Anteile der Informationsaufnahme können von dem visuellen auf den auditiven Sinneskanal verlegt werden, was nach dem Multiple-Ressourcen-Modell von Wickens [175] zu einer geringeren Beanspruchung führen sollte. Darüber hinaus leiten Fahrer, die eine Reflexion erhalten, das Fahrmanöver für den Fahrstreifenwechsel unmittelbarer ein und beschleunigen oder bremsen früher als Fahrer, die keine akustische Unterstützung erhalten. So verkürzt das Informationskonzept die Reaktionszeit auf eine Fahrstreifenwechsel-Instruktion signifikant um 23 %. Dies verdeutlicht, dass Fahrer mit Systemkenntnis die akustische Reflexion sowohl zur Situationsüberwachung als auch zur Orientierung bei der Fahraufgabe nutzen. Dieser Effekt kann jedoch auch als kritisch angesehen werden, da bei einer „Fehlinformation“ – also einer ausbleibenden Rückmeldung – angenommen werden kann, dass sich Fahrer, die sich zu sehr auf die akustische Rückmeldung verlassen, Fahrzeuge im toten Winkel übersehen. Aus diesem Grund sollte ein Assistenzsystem, welches solch ein akustisches Informationskonzept verwendet, eine hohe Zuverlässigkeit aufgrund einer niedrigen Falsch-Negativ-Rate aufweisen (vgl. Kap. 4.1.2). Wie kritisch sich eine ausbleibende Rückmeldung auf das Fahrverhal-

ten auswirkt, kann jedoch nicht aus dem hier vorgestellten Versuch abgeleitet werden. Hierfür sind zusätzliche Prüfsituationen notwendig, in denen es zu einer Fehlinformation kommt. Darüber hinaus liefert der Versuch keine Erkenntnisse darüber, wie Fahrer ihr Verhalten beim Fahrstreifenwechsel durch das Informationskonzept langfristig verändern. Die Analyse der Lerneffekte zeigt hierzu keine signifikanten Unterschiede im Blick- und Fahrverhalten.

Seitens der technischen Umsetzung ergibt sich nun die Frage, wie das Informationskonzept ohne Kopfhörer über das Hifi-System im Realfahrzeug dargestellt werden kann. Eine Möglichkeit ist die Mikrofonaufnahme des Schallfelds im Fahrzeuginnenraum und eine räumlich-gerichtete Ausgabe der daraus berechneten Reflexion über das 7.2 Surround Hifi-System. Eine weitere interessante Fragestellung ist, ob das Reflexions-Prinzip auch mit anderen Klangquellen (z. B. Musik) wirksam ist. Darüber hinaus stellt die Anpassung der Reflexionsstärke an den lateralen Abstand zum Totwinkelfahrzeug eine mögliche Verbesserung der Wirksamkeit dar. In dem hier vorgestellten Fahrsimulatorversuch ist die Stärke der Reflexion ausschließlich von dem longitudinalen Abstand zum Totwinkelfahrzeug abhängig. Durch solch eine Kopplung (z. B. eine Abnahme der TLC führt zu einer stärkeren Reflexion) gewinnt die akustische Rückmeldung an Dynamik, was die Aufmerksamkeit stärker bindet [45].

---

## Zusammenfassung und Ausblick

---

Die hohe Anzahl an Unfällen mit Personenschäden im Längsverkehr ist die Hauptmotivation für das Thema dieser Arbeit. Hierbei stellt sich der Informationsfehler als eine der häufigsten Unfallursachen heraus. Ein Ziel der vorliegenden Arbeit ist somit die Entwicklung neuartiger Warn- und Informationskonzepte, die bereits in der frühen Phase einer kritischen Verkehrssituation das Risiko eines Informationsfehlers reduzieren. Die hierfür betrachteten Verkehrssituationen sind eine Auffahrsituation mit visueller Abwendung vom Verkehrsgeschehen, und eine Fahrstreifenwechsel-Situation, bei der sich ein Fahrzeug im toten Winkel befindet. Für diese Anwendungsfälle werden neuartige Warn- und Informationskonzepte vorgestellt, im Fahrsimulator umgesetzt und auf ihre Wirksamkeit im Rahmen von Probandenstudien überprüft.

Hierfür wird in Kapitel 2 der Einfluss des Fahrerzustands auf die Fahrzeugführung beschrieben und hieraus der für diese Arbeit relevante Anwendungsfall abgeleitet. Aufgrund der hohen Nutzungsrate des Infotainments und der dadurch resultierenden Effekte auf die primäre Fahraufgabe ist eine verminderte Aufmerksamkeit aufgrund von Tertiär-Tätigkeiten (hier Blickabwendung ins CID) der hier betrachtete Fahrerzustand.

In Kapitel 3 wird die Mensch-Maschine-Schnittstelle etablierter Fahrerassistenzsysteme beschrieben, potentielle Schwachpunkte identifiziert und Anforderungen an die Warn- und Informationskonzepte abgeleitet. Der entscheidende Schwachpunkt von FAS der Längsführung ist, dass der visuelle Aufmerksamkeitszustand in der Warnstrategie nicht berücksichtigt wird. Bei FAS der Querverführung wird die fahrerinitiierte Auslösung der Spurwechselwarnung – durch Setzen des Blinkers – als Schwachpunkt identifiziert. Hierdurch können Assistenzausgaben in der frühen Phase einer kritischen Verkehrssituation übersehen werden.

Anschließend werden in Kapitel 4 neuartige indirekte Verfahren zur Schätzung des visuellen Aufmerksamkeitszustands vorgestellt. Diese Verfahren ermöglichen es, anhand der primären und tertiären Fahrer-Fahrzeuginteraktion Blickabwendungen ins CID in Echtzeit zu schätzen. Hierbei werden a-priori und heuristische Modellierungsverfahren auf Basis von Fahrsimulatordaten angewendet und auf ihre Klassifikationsgüte miteinander verglichen. So können für die hier definierte Prüfsituation – eine Folgefahrt auf einer Autobahn – Blickabwendungen ins CID mittels einfacher „Wenn ... dann - Regeln“ (a-priori) mit einer Klassifikationsgüte von bis zu 69 % geschätzt werden.

Basierend auf dieser Fahrerzustandsschätzung werden in Kapitel 5 fahrerabhängige Warnkonzepte für eine Auffahrwarnung abgeleitet und in einer Fahrsimulatorstudie mit einem herkömmlichen Warnkonzept verglichen. So kann gezeigt werden, dass ein peripherer optischer Reiz im HUD und ein optisch bewegter Reiz in Form einer Bewegungsanimation schnellere Blick- und Bremsreaktionen als die Kontroll-Bedingung (Stand der Technik der Auffahrwarnung) verursachen.

In Kapitel 6 wird ein neuartiges Informationskonzept für eine Spurwechselwarnung vorgestellt. Mittels akustischer Reflexion werden dem Fahrer Fahrzeuge im toten Winkel dezent dargestellt. In einer Fahrsimulatorstudie kann gezeigt werden, dass das Assistenzkonzept in einer Totwinkelsituation mehr Absicherungsblicke und somit weniger Kollisionen als die Kontroll-Bedingung (keine Assistenz) verursacht.

Die Ergebnisse von Kapitel 4, 5 und 6 zeigen somit, dass die hier vorgestellten Assistenzkonzepte frühzeitig das Risiko eines Informationsfehlers verringern, indem eine schnelle und automatisch ablaufende Ausrichtung der Aufmerksamkeit auf die Gefahr erfolgt, was zu einer Reduzierung von Unfällen im Längsverkehr führen kann. Die hierbei gewonnen Erkenntnisse können auf konzeptioneller und methodischer Ebene wie folgt zusammengefasst werden:

### **Konzeptionelle Erkenntnisse:**

Grundlegende Phänomene der Wahrnehmungspsychologie werden in dieser Arbeit zum Teil erstmals auf den Fahrerassistenz-Kontext übertragen (z. B. stroboskopische Bewegungsanimation und akustische Reflexion). Es kann gezeigt werden, dass die hier erarbeiteten Erkenntnisse hohes Potential für die MMS von Assistenzsystemen haben:

- Blickabwendungen aufgrund von Nebentätigkeiten können indirekt und ausreichend genau über die Primär- und Tertiärinteraktion in Echtzeit geschätzt werden
- Die Anpassung optischer Warnausgaben an den visuellen Aufmerksamkeitszustand hinsichtlich Reizintensität, Richtungsspezifität und Dynamik führt zu kürzeren Blick- und Bremsreaktionszeiten. Dies gilt für
  - einen bewegten optischen Reiz in Richtung der Gefahr (animierte Blickführung) und
  - einen statischen optischen Reiz aus der Richtung der Gefahr (periphere Blickführung)
- eine Darstellung von Fahrzeugen im toten Winkel mit Hilfe von Schallreflexionen

- 
- führt zu einer Erhöhung der Absicherungsaktivität im Erstkontakt
  - führt zu weniger Kollisionen in Totwinkelsituationen und
  - wird als weniger störend empfunden als herkömmliche Akustik-Konzepte wie z. B. Auditory Icons oder Warntöne

### **Methodische Erkenntnisse:**

Die hier beschriebenen methodischen Erkenntnisse können als Empfehlung für die Gestaltung von Wirksamkeitsstudien neuartiger Assistenzkonzepte verstanden werden:

- Probanden weisen starke Unterschiede in ihrem Reaktionsverhalten zwischen der ersten und weiteren Prüfsituationen auf. Daher wird für Probandenstudien mit mehreren Versuchsbedingungen – also z. B. mit verschiedenen Warnkonzepten – ein zweiteiliges Versuchsdesign empfohlen:
  - **1. Teil (nicht instruiert):** Die Probanden werden vorab nicht über das Ziel des Versuchs informiert und erleben nur eine einzige Prüfsituation. Diese erscheint für die Probanden überraschend. Aufgrund der zu erwartend hohen Varianz im Reaktionsverhalten sollte eine nicht zu kleine Stichprobe gewählt werden (pro Versuchsbedingung  $N > 15$ ) und die Versuchsdauer eher kurz gehalten werden ( $< 10$  Minuten). Die verschiedenen Versuchsbedingungen werden in einem Between-Subjects Design geprüft. Da Fahrer Assistenzangaben unter realen Bedingungen ebenfalls unvorbereitet erhalten, haben die Ergebnisse eine relativ hohe externe Validität.
  - **2. Teil (instruiert):** Die Probanden werden vorab über die Prüfsituationen und gegebenenfalls über die einzelnen Versuchsbedingungen informiert. Die verschiedenen Versuchsbedingungen werden in einem Within-Subjects Design geprüft, wobei die Reihenfolge der Versuchsbedingungen permutiert wird. Hierdurch können mehrere Versuchsbedingungen miteinander verglichen werden und durch Messwiederholung einer Versuchsbedingung Lerneffekte untersucht werden.
- Ein Near-Crash Design eignet sich zur Gestaltung von Prüfsituationen. Um eine hohe Reliabilität der Prüfsituation zu erhalten, sollten bestimmte Gestaltungsparameter der Prüfsituation (z. B. Zeitlücke, lateraler oder longitudinaler Abstand zum Zielfahrzeug) mit Hilfe einer automatischen Regelung konstant gehalten werden.
- Eine Analyse des Fahr- und Blickverhaltens, bezogen auf separate Ablauf-Phasen, liefert das zeitliche Wirkpotential von Assistenzangaben in kritischen Verkehrssituationen (z. B. OODA-Loop oder Handlungsphasen bei Fahrstreifenwechsel). Hierfür sollten trennscharfe Start- und Endzeitpunkte der einzelnen Ablauf-Phasen definiert werden (z. B. Beginn Orientierungsphase: Schwerpunkt des Führungsfahrzeugs kreuzt Fahrstreifenmarkierung).

Die hier gewonnen Erkenntnisse motivieren zu weiteren Forschungsaktivitäten im Bereich der MMS von Fahrerassistenzsystemen. Demnach ist weiterhin zu prüfen, inwieweit sich die erarbeiteten Assistenzkonzepte auf andere Anwendungsfälle übertragen lassen. Zum Beispiel wird die Unfallart „Unfall mit entgegenkommendem Fahrzeug“ nicht in dieser Arbeit behandelt, nimmt aber dennoch einen hohen Anteil an Unfällen im Längsverkehr ein. Vielversprechend scheint für diesen Anwendungsfall die Verwendung der Warnkonzepte animierte und periphere Blickführung zu sein. Wird ein entgegenkommendes Fahrzeug frühzeitig von der Sensorik erkannt, so kann hierdurch die Aufmerksamkeit des Fahrers schnell auf die Gefahr gelenkt werden und der Fahrer kann selbstständig ausweichen. In einer zeitkritischeren Verkehrssituation sind jedoch andere Assistenzkonzepte, wie kurzzeitige Eingriffe oder autonome Ausweichmanöver, zu prüfen. Darüber hinaus ist weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeit erforderlich, um die hier gewonnen Erkenntnisse auf das Realfahrzeug zu übertragen. Inwieweit die periphere und animierte Blickführung unter realen Lichtverhältnissen wirksam sind, sollte in weiteren Untersuchungen überprüft werden. Vermutlich ist eine Anpassung der Reizintensität erforderlich (z. B. Leuchtstärke der LEDs). Auch bei dem Informationskonzept der akustischen Reflexion sind Weiterentwicklungen notwendig. Beispielsweise sollte die Reflexionsstärke bei Störgeräuschen im Fahrzeuginnenraum (z. B. Wummern durch Fahrbahnunebenheiten) so angepasst werden, dass das Informationskonzept jederzeit wahrnehmbar bleibt. Aufgrund der zunehmenden Forschungsaktivität zum Hochautomatisierten Fahren (siehe Förderprojekte Ko-HAF und Interactive 2), stellt sich auch die Frage, inwieweit die hier für das manuelle Fahren entwickelten MMS-Konzepte auf das Hochautomatisierte Fahren übertragbar sind. Mit steigender Automatisierung werden sich die Fahrer möglicherweise zunehmend aus der Fahraufgabe herausnehmen und mit anderen Aufgaben beschäftigen. Eine zentrale Fragestellung der MMS-Forschung wird daher sein: *„Wie kann der Fahrer in kritischen Situationen, z. B. an Systemgrenzen, schnell und sicher zurück in die Fahraufgabe geführt werden?“* Die in dieser Arbeit vorgestellten Warn- und Informationskonzepte können eine Lösung für diese Fragestellung darstellen. Um dies zu prüfen, sind jedoch weitere Untersuchungen notwendig.



---

## Anhang

---

## Anhang A: Fahrstudie zur Entwicklung eines Fahrerzustandsmodells

### A.1 Instruktionen vor Versuchsbeginn

#### **- Instruktion vor der Simulatorfahrt -**

Herzlich willkommen zu unserer Studie im statischen Fahrstudie!

Bitte machen Sie es sich bequem und stellen Sie den Sitz so ein, wie Sie es bei einer bevorstehenden Fahrt in einem realen Fahrzeug tun würden. Dieses Auto funktioniert wie ein Fahrzeug mit Automatik, d.h., Sie müssen nicht schalten oder die Kupplung bedienen.

Wenn Sie geradeaus schauen, sehen Sie dort eine große Leinwand, die gleich die Fahrtstrecke anzeigen wird. Wie in einem normalen Fahrzeug können Sie während der Fahrt sowohl Rück- und Seitenspiegel, Blinker als auch die Anzeigen im Kombi (Tachometer, Drehzahlmesser) und die Geschwindigkeitsanzeige im Head-Up Display nutzen. Bitte fahren Sie so, wie Sie sich auch im normalen Straßenverkehr verhalten würden.

Ihre Fahrt beinhaltet ausschließlich eine Strecke auf einer dreispurigen Autobahn. Bitte halten Sie sich an die Spur- und Geschwindigkeitsvorgaben, die wir Ihnen mittels Mikrofon durchsagen (60 km/h oder 80 km/h). Falls dies die Verkehrssituation nicht zulassen sollte, fahren Sie bitte in einem dementsprechend angepassten Tempo.

Während der Fahrt bekommen Sie die Aufgabe, verschiedene Orte im iDrive Menü „Navigation“ mit Hilfe des Spellers einzustellen. Achten Sie bitte auch hier auf unsere Durchsage. Sie haben natürlich vor Ihrer Fahrt die Möglichkeit, sich mit der Bedienung des iDrive Systems vertraut zu machen.

Im Anschluss an eine Eingewöhnungsfahrt, in der Sie sich an das Fahren im Fahrstudie gewöhnen können, bitten wir Sie, für unsere Untersuchung zwei Fahrten zu absolvieren. Zwischen den Fahrten können Sie eine kurze Pause machen.

Bitte sagen Sie Bescheid, falls Sie sich zu irgendeinem Zeitpunkt nicht wohl fühlen. Sie können die Studie jederzeit abbrechen.

Diese Instruktion wird auch in der Studie aus Kapitel 5 verwendet

## A.2 Demographischer Fragebogen

<b>Vpn:</b> _____	<b>Datum:</b> _____	<b>Variante:</b> _____
<b>VL:</b> _____	<b>Uhrzeit:</b> _____	
<b>Vom Versuchsleiter auszufüllen!</b>		

**Sehr geehrte Teilnehmerin, sehr geehrter Teilnehmer,**  
vielen Dank für Ihr Interesse an unserer Untersuchung. Wir benötigen einige persönliche Daten von Ihnen und bitten Sie, den folgenden Fragebogen auszufüllen. Diese Daten werden absolut vertraulich behandelt und ausschließlich für die statistische Auswertung verwendet.

**1. Geschlecht:**  weiblich  
 männlich

**2. Alter:** \_\_\_\_\_ Jahre

**3. Höchster Bildungsabschluss:**  Hauptschulabschluss  Fachhochschulabschluss  
 Mittlere Reife  Hochschulabschluss  
 Abitur  Promotion

**4. Beruf:** \_\_\_\_\_

**5. Führerschein seit:** \_\_\_\_\_ Jahren

**6. Haben Sie eine Farbschwäche?**  Nein  
 Ja: Rot/ Grün  
 Ja: Blau/ Gelb

**7. Welche Händigkeit besitzen Sie?**  Rechtshänder  
 Linkshänder  
 Beides

**8. Welches Auto fahren Sie zur Zeit?** \_\_\_\_\_ Bj.

**9. Wie häufig fahren Sie?**  täglich  
 mehrmals pro Woche  
 mehrmals pro Monat  
 weniger als 1 mal pro Monat

**10. Wie hoch ist Ihre jährliche Fahrleistung?**  
 weniger als 5.000 km  
 5.000 km bis 10.000 km  
 10.000 km bis 20.000 km  
 mehr als 20.000 km

**11. ... davon hauptsächlich:**  Stadtfahrten  
 Überlandfahrten  
 Autobahnfahrten

- 12. Wie schätzen Sie Ihren Fahrstil ein?**
- sehr ruhig
  - eher ruhig
  - teils-teils
  - eher sportlich
  - sehr sportlich

- 13. Wie beurteilen Sie Ihr eigenes technisches Interesse?**
- sehr wenig Interesse
  - wenig Interesse
  - teils-teils
  - viel Interesse
  - sehr viel Interesse

- 14. Haben Sie schon einmal an einem Fahrversuch in einem Fahrsimulator teilgenommen?**
- noch nie
  - ja, etwa 1-5 mal
  - ja, sehr oft (>5 mal)

- 15. Spielen Sie privat Computerspiele?**
- Ja
  - Nein

- 16. Falls ja, spielen Sie Computerspiele mit einem Spielenkrad?**
- Ja
  - Nein

Zum Schluss schätzen Sie bitte Ihre **Erfahrung** im Umgang mit **Fahrerinformationssystemen** (z.B. Navigation) ein. Dazu steht Ihnen eine Skala von 0 (keine Erfahrung) bis 3 (sehr viel Erfahrung) zur Verfügung.

	<b>0</b> (keine Erfahrung)	<b>1</b> (schon davon gehört/ sehr wenig Erfahrung)	<b>2</b> (schon ausprobiert/ Erfahrung vorhanden)	<b>3</b> (nutze ich regelmäßig/ sehr viel Erfahrung)
BMW iDrive	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Systeme anderer Automobilhersteller	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Falls Erfahrung mit anderen Systemen: welche(r) Hersteller?				

**Vielen Dank für Ihre Teilnahme an unserer Untersuchung!**

Dieser Fragebogen wird auch in der Studie aus Kapitel 5 verwendet

### A.3 Blickverhalten aller Probanden des gesamten Datensatzes

	VP	Bedientyp	Mittlere Blickabwendungsdauer [s]	PRC [%]	Anzahl Blickabwendungen
Trainingsdatensatz	1	Blickbediener	1,37	78	9
	2	Blickbediener	1,40	35	7
	3	Blickbediener	2,06	46	6
	3	Normalbediener	1,16	28	11
	4	Normalbediener	1,05	44	10
	5	Normalbediener	1,03	42	10
	6	Normalbediener	0,99	45	11
	7	Normalbediener	1,04	44	9
	8	Normalbediener	1,16	50	8
	9	Normalbediener	0,94	46	10
	10	Blindbediener	0,89	52	15
	11	Blindbediener	0,68	56	14
	12	Blindbediener	0,88	66	9
	13	Blindbediener	0,75	28	15
	<b>Mittelwerte (SD):</b>		M = 1,03 (0,21)	M = 45 (11)	M = 10,62 (2,57)
Testdatensatz	14	Blickbediener	1,59	34	7
	15	Blickbediener	1,44	37	9
	16	Blickbediener	1,35	45	7
	17	Normalbediener	1,06	56	9
	18	Normalbediener	1,03	37	10
	19	Normalbediener	0,99	45	13
	20	Normalbediener	1,01	59	11
	21	Normalbediener	0,98	32	14
	22	Normalbediener	1,06	63	10
	23	Normalbediener	1,17	43	14
	24	Blindbediener	0,95	56	7
	25	Blindbediener	0,97	52	8
	26	Blindbediener	0,75	52	10
	27	Blindbediener	0,87	52	9
	<b>Mittelwerte (SD):</b>		M = 1,09 (0,23)	M = 47 (10)	M = 9,86 (2,41)

**Tabelle 1:** Aufteilung des Gesamtdatensatzes in Trainings- und Testdatensatz mit Angabe der mittleren Blickabwendungsdauer, PRC und der mittleren Anzahl der Blickabwendungen

## A.4 Aufbau des Entwicklungs- und Bewertungs-Frameworks

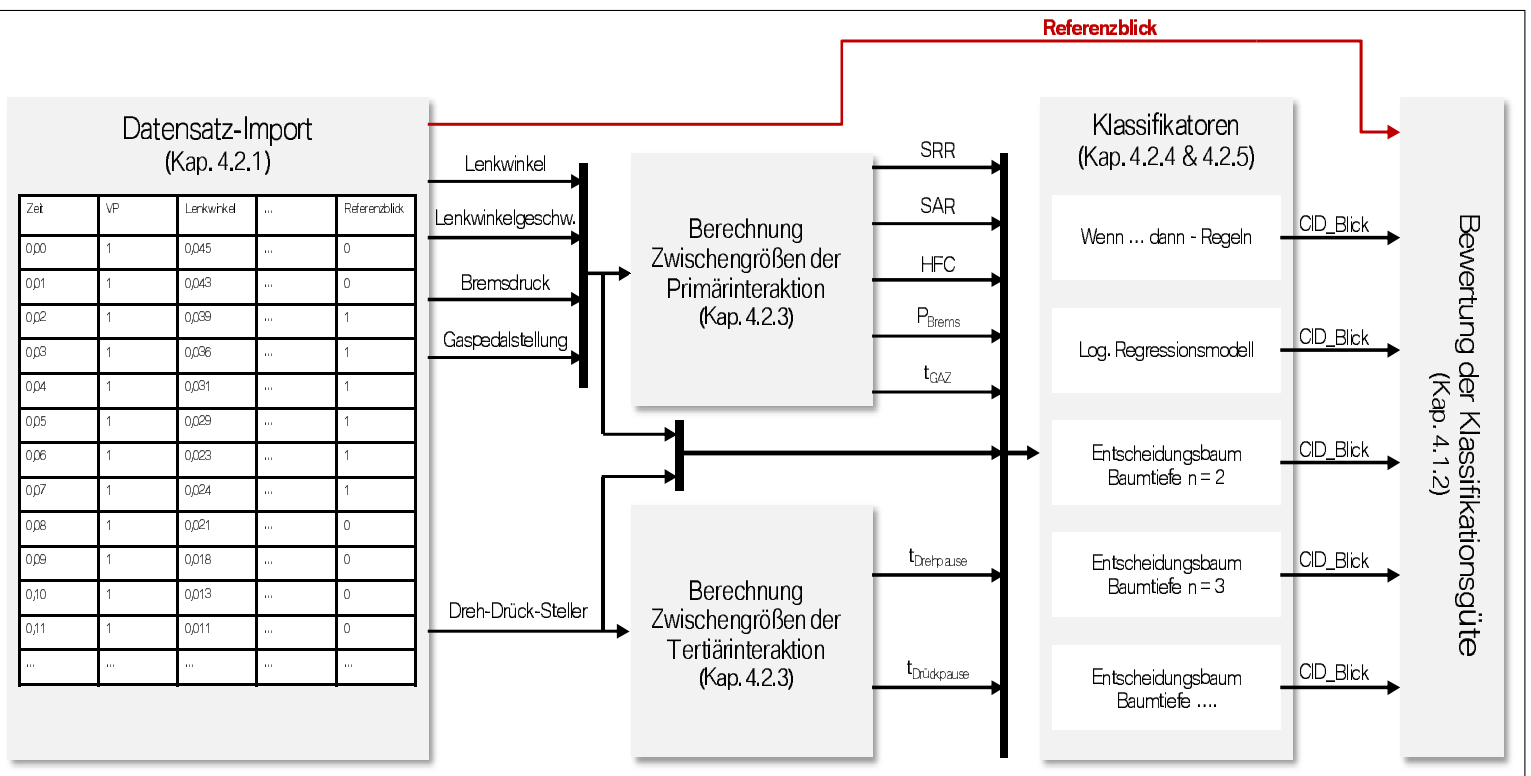


Abbildung 1: Module: Dateneinlese, Berechnung der Zwischengrößen, Klassifikation und Bewertung

---

## A.5 Beschreibung des C5.0 Algorithmus'

Die folgenden theoretische Grundlagen und Beispiele sind aus der Literatur entnommen (siehe z. B. [162] [90] [60]).

Zur Generierung eines Entscheidungsbaums werden die Attribute nach ihrem Informationsgehalt bewertet und die Gesamtstichprobe anhand des Attributs mit dem höchsten Informationsgehalt unterteilt. Dies wird rekursiv an jeder entstehenden Teilstichprobe durchgeführt, bis die optimale Trennung aller Instanzen vorgenommen ist. Zunächst wird die Entropie aller vorkommender Klassen berechnet, was ein Maß für die Unsicherheit des Trainingsdatensatzes darstellt:

$$Entropie(S) = - \sum_{i=1}^n \frac{|S_i|}{|S|} \cdot \log_2 \left( \frac{|S_i|}{|S|} \right) \quad (1)$$

mit:

S: Anzahl aller Instanzen

$S_i$ : Anzahl der Instanzen, die zur Klasse i gehören

n: Anzahl Klassen

Eine niedrige Entropie bedeutet weniger Unsicherheit. Mit Hilfe des Information Gains kann nun die erwartete Reduktion der Entropie durch die Trennung der Instanzen anhand des entsprechenden Attributs bestimmt werden. Der Information Gain beschreibt somit den Informationsgehalt eines Attributs und wird wie folgt berechnet:

$$Gain(S,A) = Entropie(S) - \sum_{v \in Werte(A)} \frac{|S_v|}{|S|} \cdot Entropie(S_v) \quad (2)$$

mit:

S: Anzahl aller Instanzen

$S_v$ : Anzahl der Instanzen für die der Attributwert  $v$  ist

A: Attribut

Werte (A): Anzahl verschiedener Attributwerte

Hierbei können jedoch Attribute mit vielen verschiedenen Werten bevorzugt werden, daher wird beim C5.0 Algorithmus das Gain Ratio-Maß als Trennungskriterium verwendet. Dieses normalisiert das Information Gain anhand der Split Information:

$$GainRatio(S,A) = \frac{Gain(S,A)}{SplitInformation(S,A)} \quad (3)$$

Die Split Information berechnet sich folgendermaßen:

$$SplitInformation(S,A) = - \sum_{v \in Werte(A)} \frac{|S_v|}{|S|} \cdot \log_2 \left( \frac{|S_v|}{|S|} \right) \quad (4)$$

mit:

S: Anzahl aller Instanzen

$S_v$ : Anzahl der Instanzen für die der Attributwert  $v$  ist

A: Attribut

Werte (A): Anzahl verschiedener Attributwerte

Viele gleich große Wertegruppen eines Attributs führen demnach zu einer hohen Split Information (folglich zu einer niedrigeren  $GainRatio(S,A)$ ), wenige ungleich große Wertegruppen dagegen zu einer kleinen Split Information (folglich zu einer höheren  $GainRatio(S,A)$ ).

Zur Veranschaulichung wird im Folgenden die hier beschriebene Vorgehensweise auf die Fragestellung aus Kapitel 4 angewendet. Tabelle 2 bietet hierfür einen Beispiel-Trainingsdatensatz mit fünf Instanzen, den drei Attributen Gaspedalstellung,  $t_{Drehpause}$  und  $t_{Drückpause}$ , sowie der Klasse CID\_Blick. Zum besseren Verständnis sind die Attribute ausschließlich kategorial. Für den Umgang mit kontinuierlichen Attributen sei an dieser Stelle auf die entsprechende Fachliteratur verwiesen.

<i>Gaspedalstellung</i>	<i>t<sub>Drehpause</sub></i>	<i>t<sub>Drückpause</sub></i>	<i>CID_Blick</i>
null	kurz	lang	true
viel	kurz	kurz	false
viel	lang	lang	false
wenig	kurz	kurz	false
null	lang	kurz	false

**Tabelle 2:** Beispiel-Trainingsdatensatz

### Rekursionsstufe I:

Um das „beste“ Attribut für den Wurzelknoten zu finden, wird im ersten Rekursionsschritt die Gain Ratio aller Attribute berechnet. Das Attribut mit der höchsten Gain Ratio bildet den Wurzelknoten.

#### Schritt 1:

Bestimmung der Entropie nach Gl. 1 mit  $S = 5$ ,  $S_{i=true} = 1$  und  $S_{i=false} = 4$ :

$$Entropie(S) = -\frac{1}{5} \cdot \log_2 \left( \frac{1}{5} \right) - \frac{4}{5} \cdot \log_2 \left( \frac{4}{5} \right) = 0,7219 \quad (5)$$

#### Schritt 2:

Berechnung des Information Gains nach Gl. 2. Demnach ergibt sich für das Attribut Gaspedalstellung:



---

1. Berechnung der Entropie( $S_v$ ) für Gaspedalstellung = „null“ mit  $S_v = 2$ . Darunter sind 1 x true und 1 x false:

$$Entropie(S_{v=null}) = -\frac{1}{2} \cdot \log_2\left(\frac{1}{2}\right) - \frac{1}{2} \cdot \log_2\left(\frac{1}{2}\right) = 1,0 \quad (6)$$

2. Berechnung der Entropie( $S_v$ ) für Gaspedalstellung = „viel“ mit  $S_v = 2$ . Darunter sind 0 x true und 2 x false:

$$Entropie(S_{v=viel}) = -\frac{0}{2} \cdot \log_2\left(\frac{0}{2}\right) - \frac{2}{2} \cdot \log_2\left(\frac{2}{2}\right) = 0 \quad (7)$$

3. Berechnung der Entropie( $S_v$ ) für Gaspedalstellung = „wenig“ mit  $S_v = 1$ . Darunter sind 0 x true und 1 x false:

$$Entropie(S_{v=wenig}) = -\frac{0}{1} \cdot \log_2\left(\frac{0}{1}\right) - \frac{1}{1} \cdot \log_2\left(\frac{1}{1}\right) = 0 \quad (8)$$

Einsetzen der einzelnen Entropien in Gl. 2 ergibt den Information Gain für das Attribut Gaspedalstellung:

$$Gain(S, A = Gaspedalstellung) = Entropie(S) - \underbrace{\frac{2}{5}}_{\frac{S_v}{S}} \cdot Entropie(S_{v=null}) - \underbrace{\frac{2}{5}}_{\frac{S_v}{S}} \cdot Entropie(S_v) - \underbrace{\frac{1}{5}}_{\frac{S_v}{S}} \cdot Entropie(S_{v=wenig}) = 0,3219 \quad (9)$$

Analog zur Berechnung des Attributs Gaspedalstellung ergeben sich für die Attribute  $t_{Drehpause}$  und  $t_{Drückpause}$  folgende Information Gains:

$$Gain(S, A = t_{Drehpause}) = 0,2657 \quad (10)$$

$$Gain(S, A = t_{Drückpause}) = 0,3219 \quad (11)$$

### Schritt 3:

Unter Verwendung von Gl. 4 kann die Split Information für das Attribut Gaspedalstellung wie folgt berechnet werden:

$$\begin{aligned}
 \text{SplitInformation}(S, A = \text{Gaspedalstellung}) = & - \underbrace{\frac{2}{5}}_{\frac{S_v}{S}, v=\text{null}} \cdot \log_2\left(\frac{2}{5}\right) - \underbrace{\frac{2}{5}}_{\frac{S_v}{S}, v=\text{viel}} \cdot \log_2\left(\frac{2}{5}\right) \\
 & - \underbrace{\frac{1}{5}}_{\frac{S_v}{S}, v=\text{wenig}} \cdot \log_2\left(\frac{1}{5}\right) = 1,5218
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

Analog für die Attribute  $t_{\text{Drehpause}}$  und  $t_{\text{Drückpause}}$  ergibt sich:

$$\text{SplitInformation}(S, A = t_{\text{Drehpause}}) = 0,970
 \tag{13}$$

$$\text{SplitInformation}(S, A = t_{\text{Drückpause}}) = 0,970
 \tag{14}$$

Schritt 4:

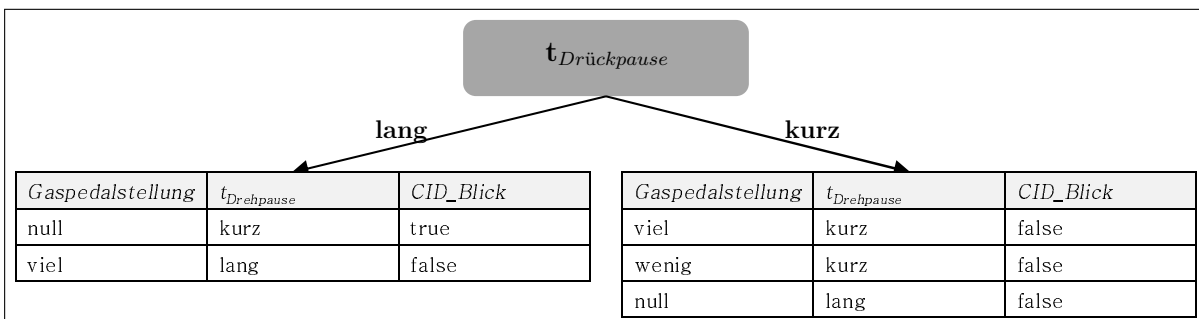
Durch Einsetzen der berechneten Gain und Split Information in Gl. 3 kann die gesuchte Gain Ratio für die drei Attribute berechnet werden:

$$\text{GainRatio}(S, A = \text{Gaspedalstellung}) = 0,211
 \tag{15}$$

$$\text{GainRatio}(S, A = t_{\text{Drehpause}}) = 0,274
 \tag{16}$$

$$\text{GainRatio}(S, A = t_{\text{Drückpause}}) = 0,332
 \tag{17}$$

Damit ist die Gain Ratio maximal für das Attribut  $t_{\text{Drückpause}}$ , weshalb es als Wurzel-Attribut gewählt wird (siehe Abb. 2).



**Abbildung 2:** Entscheidungsbaum nach Rekursionsebene I

### Rekursionsstufe II:

Die Schritte aus Rekursionsstufe I können nun auf beide resultierenden Unterstichproben  $S_{lang}$  und  $S_{kurz}$  angewendet werden. In diesem Fall ist die weitere Unterteilung für die Unterstichprobe  $S_{kurz}$  trivial, da diese ausschließlich die Klasse  $CID\_Blick = false$  enthält (siehe Abb. 3).

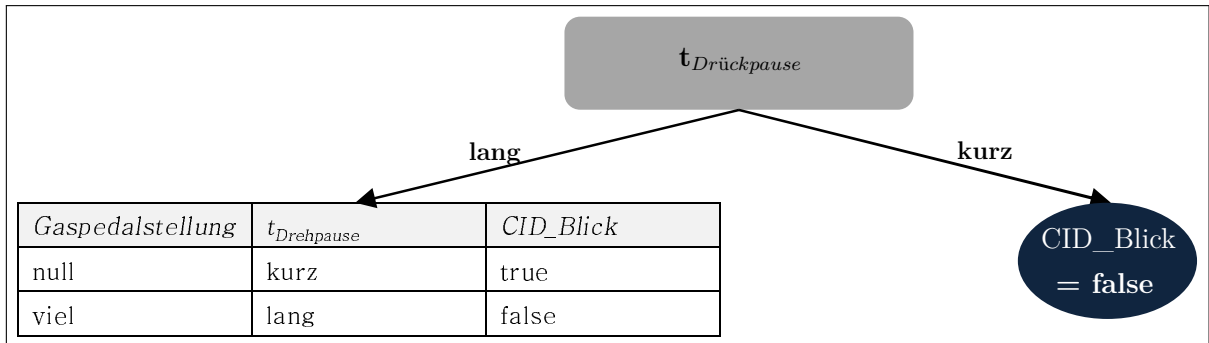


Abbildung 3: Entscheidungsbaum nach Rekursionsebene II, Teil 1

Bei der Unterstichprobe  $S_{lang}$  unterscheidet sowohl das Attribut Gaspedalstellung als auch  $t_{Drehpause}$  die Klasse  $CID\_Blick$ . Da hier analoge Datensätze vorliegen, besitzen beide Attribute die gleiche Gain Ratio. An dieser Stelle wird das Attribut Gaspedalstellung ausgewählt (siehe Abb. 4).

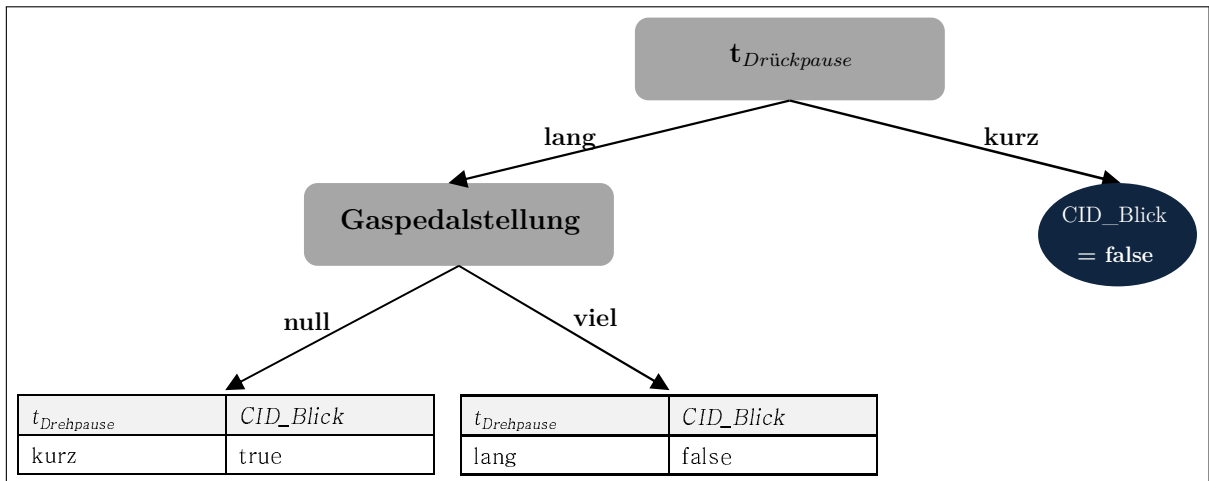


Abbildung 4: Entscheidungsbaum nach Rekursionsebene II

### Rekursionsstufe III:

Auch für die beiden verbleibenden Unterstichproben  $S_{lang,null}$  und  $S_{lang,viel}$  ist die Entscheidung trivial, da jeweils nur ein Beispiel für die Klasse  $CID\_Blick$  true bzw. false vorhanden ist. Abbildung 5 zeigt den generierten Entscheidungsbaum.

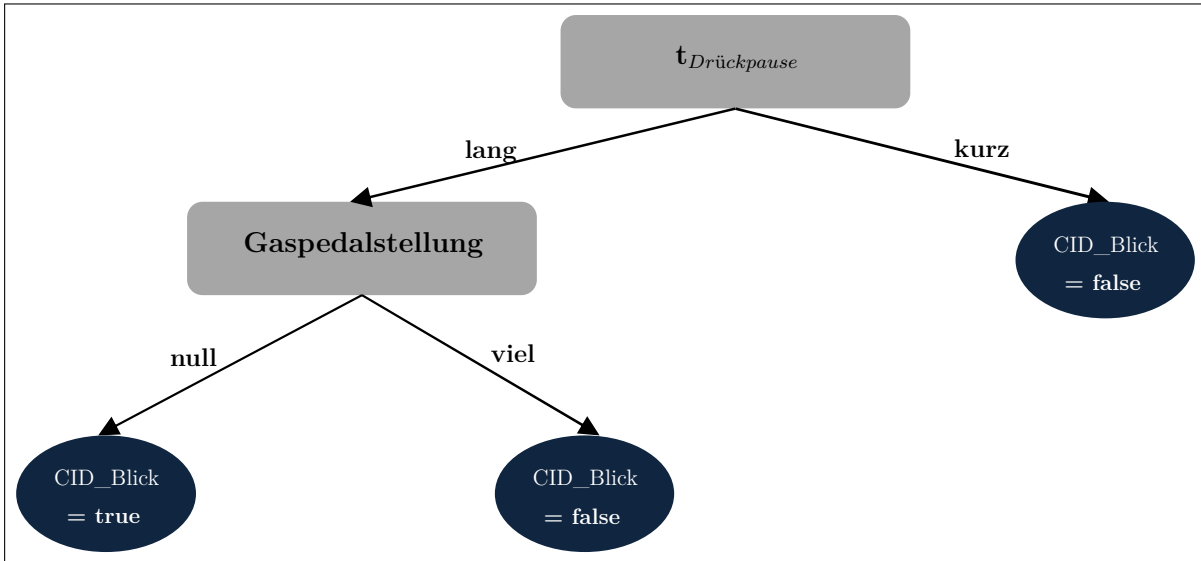


Abbildung 5: Entscheidungsbaum nach Rekursionsebene III

## A.6 Entscheidungsbaum mit einer Baumtiefe von $n = 3$

```
Regeln für 1 - mit 2 Regel(n)
  Regel 1 für 1 (9.717; 0,734)
    wenn t_Drehpause <= 0,290
    dann 1
  Regel 2 für 1 (11.875; 0,631)
    wenn t_Drueckpause > 0,510
    und t_Drueckpause <= 2,210
    dann 1
Regeln für 0 - mit 1 Regel(n)
  Regel 1 für 0 (19.416; 0,599)
    wenn t_Drehpause > 0,290
    dann 0
Standard: 1
```

Abbildung 6: Im SPSS Modeller generierte Regelmengen

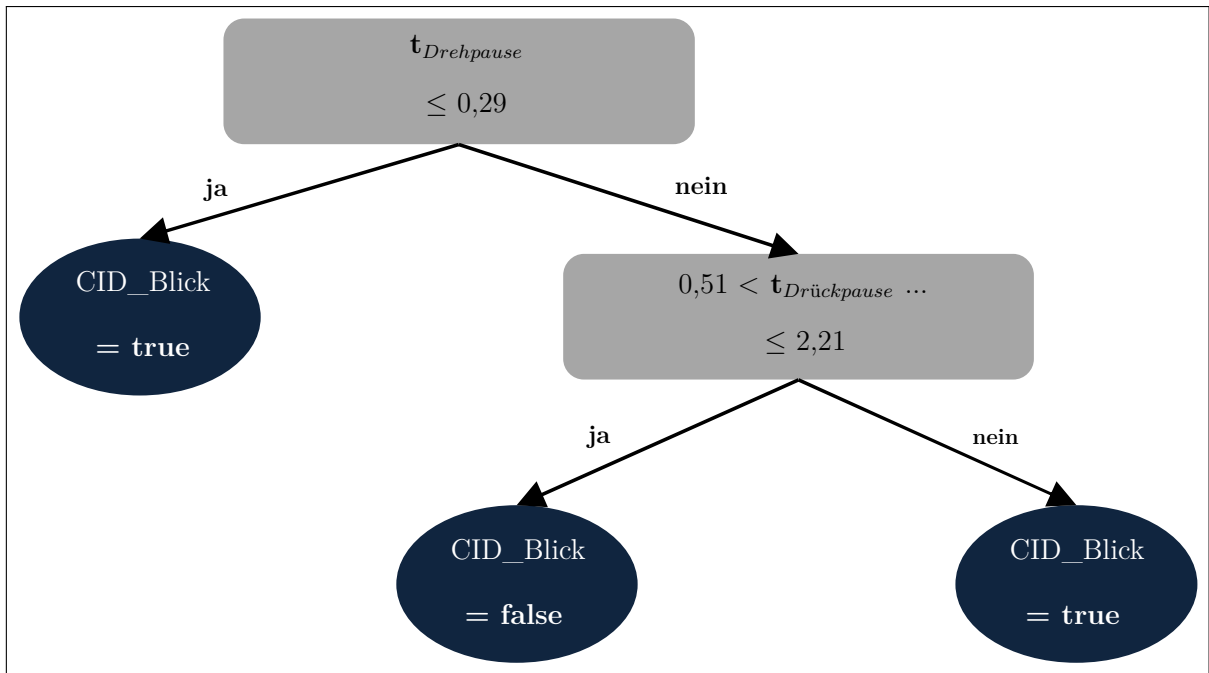


Abbildung 7: Struktur des Entscheidungsbaums

## A.7 Klassifikationsgüte der Fahrerzustandsmodelle auf Basis des Testdatensatzes

VP	MR <sub>1</sub> [%]		
	Wenn ... dann Regeln	Logistisches Regressionsmodell	Entscheidungsbaum C5.0
14	80,3	63,7	74,0
15	69,0	49,3	71,8
16	73,6	61,0	72,1
17	71,4	56,5	66,9
18	78,3	61,9	70,7
19	63,4	47,4	65,2
20	65,4	59,5	65,1
21	64,9	53,4	59,4
22	67,2	54,4	63,5
23	72,4	56,0	69,1
24	66,1	56,4	63,3
25	69,7	55,0	66,3
26	71,2	48,1	64,2
27	66,5	51,8	68,1
<b>M &amp; (SD):</b>	69,9 (4,9)	55,3 (5,1)	67,1 (7,0)

**Tabelle 3:** Nach Versuchspersonen aufgeschlüsselte Klassifikationsgüte der Fahrerzustandsmodelle auf Basis des Testdatensatzes

---

# Anhang B: Fahrstudie: Informationskonzepte für Assistenzsysteme der Querführung

## B.1 Instruktionen vor Versuchsbeginn

### - Instruktion vor der Simulatorfahrt Teil 1-

Herzlich willkommen zu unserer Studie im statischen Fahrstudie!

Bitte machen Sie es sich bequem und stellen Sie den Sitz so ein, wie Sie es bei einer bevorstehenden Fahrt in einem realen Fahrzeug tun würden. Dieses Auto funktioniert wie ein Fahrzeug mit Automatik, d.h. Sie müssen nicht schalten oder die Kupplung bedienen.

Wenn Sie geradeaus schauen, sehen Sie dort eine große Leinwand, die gleich die Fahrtstrecke anzeigen wird. Wie in einem normalen Fahrzeug können Sie während der Fahrt sowohl Rück- und Seitenspiegel, Blinker als auch die Anzeigen im Kombi (Tachometer, Drehzahlmesser) und die Geschwindigkeitsanzeige im Head-Up-Display nutzen. Bitte fahren Sie so, wie Sie sich auch im normalen Straßenverkehr verhalten würden.

Ihre Fahrt beinhaltet ausschließlich eine Strecke auf einer dreispurigen Autobahn. Bitte halten Sie sich an die Geschwindigkeitsvorgaben, die wir Ihnen mittels Mikrofon durchsagen (60 km/h oder 80 km/h). Falls dies die Verkehrssituation nicht zulassen sollte, fahren Sie bitte in einem dementsprechend angepassten Tempo. Es gilt das Rechtsfahrgebot

Bitte sagen Sie Bescheid, falls Sie sich zu irgendeinem Zeitpunkt nicht wohl fühlen. Sie können die Studie jederzeit abbrechen.

### - Instruktion vor der Simulatorfahrt Teil 2-

Ihre weitere Fahrt beinhaltet ausschließlich eine Strecke auf einer geraden dreispurigen Autobahn. Bitte versuchen Sie konstant mit 60 km/h zu fahren. Im Head-Up-Display wird Ihnen ca. alle 30 Sekunden angezeigt, auf welchem Fahrstreifen Sie fahren sollen. Wechseln Sie nach dieser Anzeige, unter Berücksichtigung der Verkehrsregeln, so schnell wie möglich auf den entsprechenden Fahrstreifen. Wird der Fahrstreifen angezeigt, auf dem Sie sich gerade befinden, so fahren Sie unverändert weiter. Ist der Fahrstreifen, auf den Sie wechseln sollen, durch ein anderes nebenher fahrendes Fahrzeug belegt, so führen Sie den Spurwechsel trotzdem durch und ordnen sich vor oder hinter dem Fahrzeug ein. Bitte fahren Sie so, wie Sie sich auch im normalen Straßenverkehr verhalten würden.

Zu Beginn erhalten Sie eine Eingewöhnungsfahrt, in der keine anderen Verkehrsteilnehmer vorkommen, und in der Sie sich mit der Anzeige im Head-Up-Display vertraut machen können. Anschließend fahren Sie die Strecke einmal mit, und einmal ohne System. Hierbei befinden sich auch andere Verkehrsteilnehmer auf der Strecke

Bitte sagen Sie Bescheid, falls Sie sich zu irgendeinem Zeitpunkt nicht wohl fühlen. Sie können die Studie jederzeit abbrechen.

## B.2 Demographischer Fragebogen

<b>Vpn:</b> _____	<b>Datum:</b> _____	<b>Variante:</b> _____
<b>VL:</b> _____	<b>Uhrzeit:</b> _____	
<b>Vom Versuchsleiter auszufüllen!</b>		
<p><b>Sehr geehrte Teilnehmerin, sehr geehrter Teilnehmer,</b> vielen Dank für Ihr Interesse an unserer Untersuchung. Wir benötigen einige persönliche Daten von Ihnen und bitten Sie, den folgenden Fragebogen auszufüllen. Diese Daten werden absolut vertraulich behandelt und ausschließlich für die statistische Auswertung verwendet.</p>		
<b>1. Geschlecht:</b>	<input type="checkbox"/> weiblich <input type="checkbox"/> männlich	
<b>2. Alter:</b>	_____ Jahre	
<b>3. Höchster Bildungsabschluss:</b>	<input type="checkbox"/> Hauptschulabschluss <input type="checkbox"/> Fachhochschulabschluss <input type="checkbox"/> Mittlere Reife <input type="checkbox"/> Hochschulabschluss <input type="checkbox"/> Abitur <input type="checkbox"/> Promotion	
<b>4. Beruf:</b>	_____	
<b>5. Führerschein seit:</b>	_____ Jahren	
<b>6. Haben Sie eine Hörschwäche?</b>	<input type="checkbox"/> Nein <input type="checkbox"/> Ja	
<b>7. Welche Händigkeit besitzen Sie?</b>	<input type="checkbox"/> Rechtshänder <input type="checkbox"/> Linkshänder <input type="checkbox"/> Beides	
<b>8. Welches Auto fahren Sie zur Zeit?</b>	_____ Bj.	
<b>9. Wie häufig fahren Sie?</b>	<input type="checkbox"/> täglich <input type="checkbox"/> mehrmals pro Woche <input type="checkbox"/> mehrmals pro Monat <input type="checkbox"/> weniger als 1 mal pro Monat	
<b>10. Wie hoch ist Ihre jährliche Fahrleistung?</b>	<input type="checkbox"/> weniger als 5.000 km <input type="checkbox"/> 5.000 km bis 10.000 km <input type="checkbox"/> 10.000 km bis 20.000 km <input type="checkbox"/> mehr als 20.000 km	
<b>11. ... davon hauptsächlich:</b>	<input type="checkbox"/> Stadtfahrten <input type="checkbox"/> Überlandfahrten <input type="checkbox"/> Autobahnfahrten	



**12. Wie schätzen Sie Ihren Fahrstil ein?**

- sehr ruhig
- eher ruhig
- teils-teils
- eher sportlich
- sehr sportlich

**13. Wie beurteilen Sie Ihr eigenes technisches Interesse?**

- sehr wenig Interesse
- wenig Interesse
- teils-teils
- viel Interesse
- sehr viel Interesse

**14. Haben Sie schon einmal an einem Fahrversuch in einem Fahrsimulator teilgenommen?**

- noch nie
- ja, etwa 1-5 mal
- ja, sehr oft (>5 mal)

**15. Spielen Sie privat Computerspiele?**

- Ja
- Nein

**16. Falls ja, spielen Sie Computerspiele mit einem Spiellenkrad?**

- Ja
- Nein

**Vielen Dank für Ihre Teilnahme an unserer Untersuchung!**

### B.3 Fragebögen zur subjektiven Bewertung

**Das gehörte Warnkonzept empfand ich als ...**

natürlich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	synthetisch
unaufdringlich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	aufdringlich
angenehm	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	nervig
nützlich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	unnützlich

Abbildung 8: Fragebogen zur Akzeptanzbewertung der Akustik-Konzepte

Das dargestellte Fahrzeug stellt Sie in der eben erlebten Situation aus der Vogelperspektive dar. Bitte zeichnen Sie alle Fahrzeuge um sich herum ein, an die Sie sich erinnern können....

Abbildung 9: Fragebogen zur Analyse des räumlichen Situationsbewusstseins

## B.4 Spektralanalyse der Akustik-Konzepte

Bei allen Darstellungen befindet sich das Fahrzeug zwischen 7 und 22 s im toten Winkel. Der linke Audiokanal ist oben dargestellt, der rechte unten.

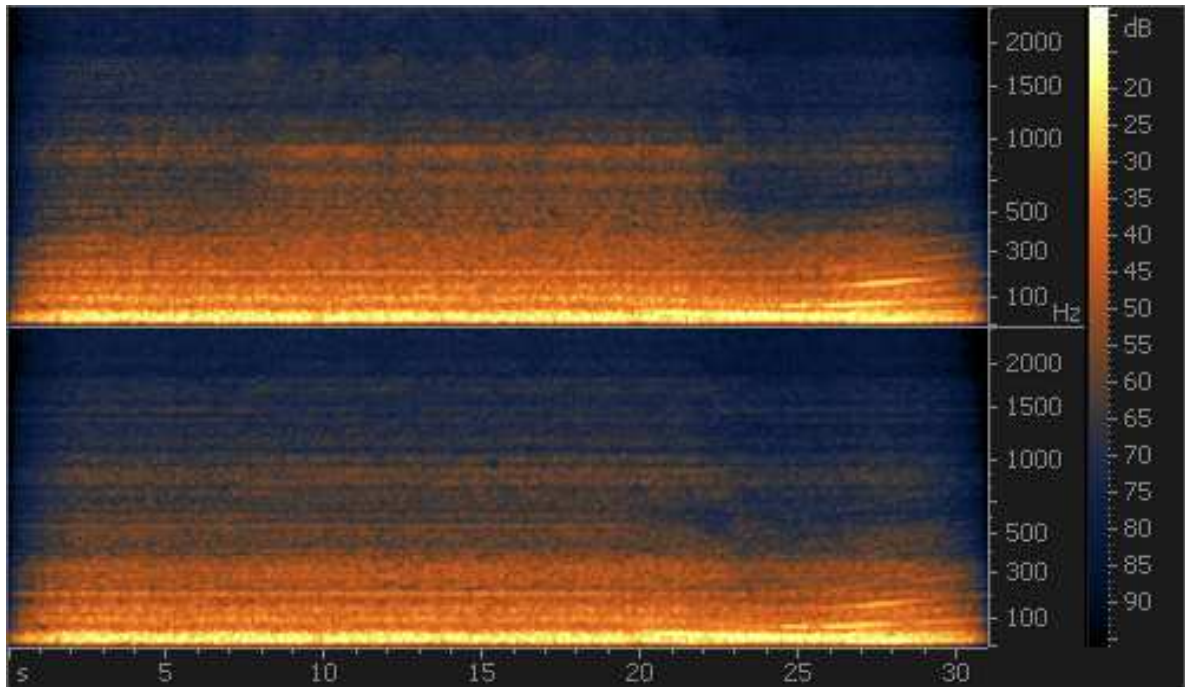


Abbildung 10: Spektrogramm der Reflexion

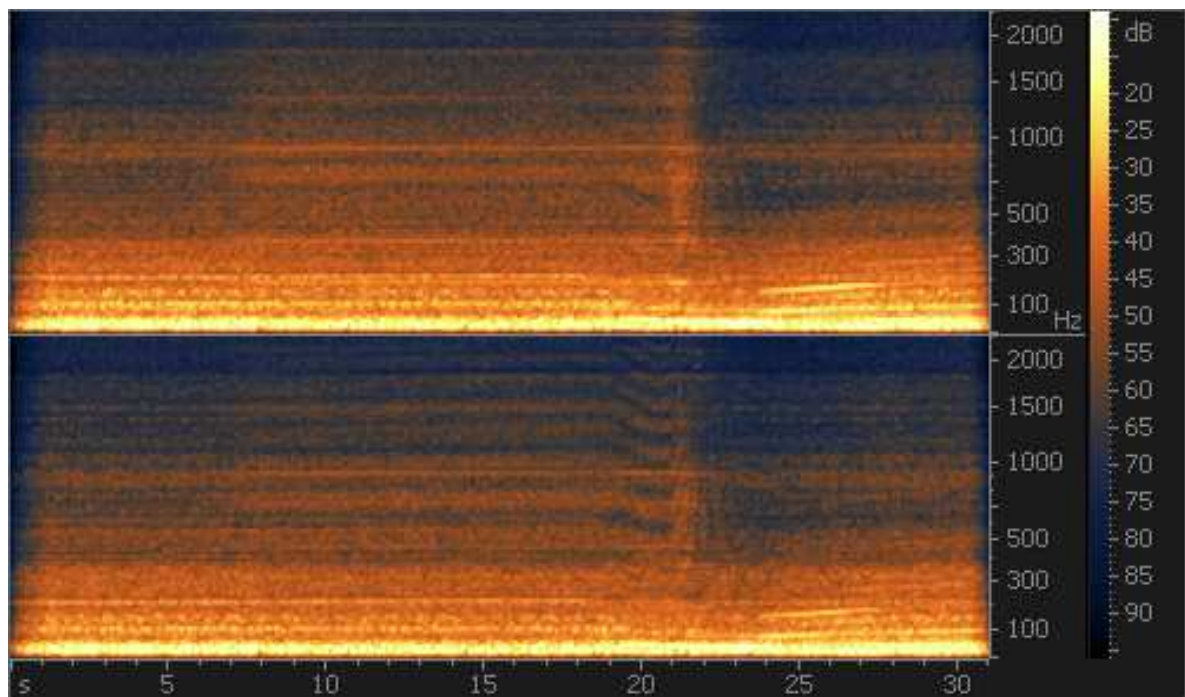


Abbildung 11: Spektrogramm des Motorgeräuschs

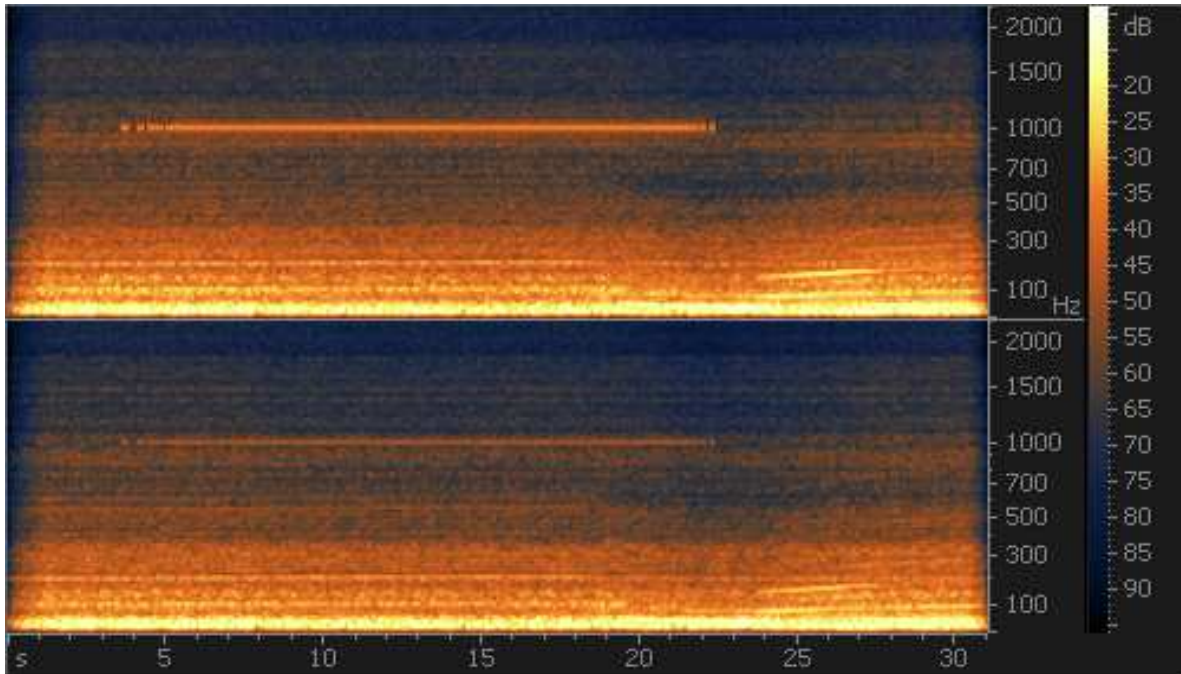


Abbildung 12: Spektrogramm des Sinus-Tons

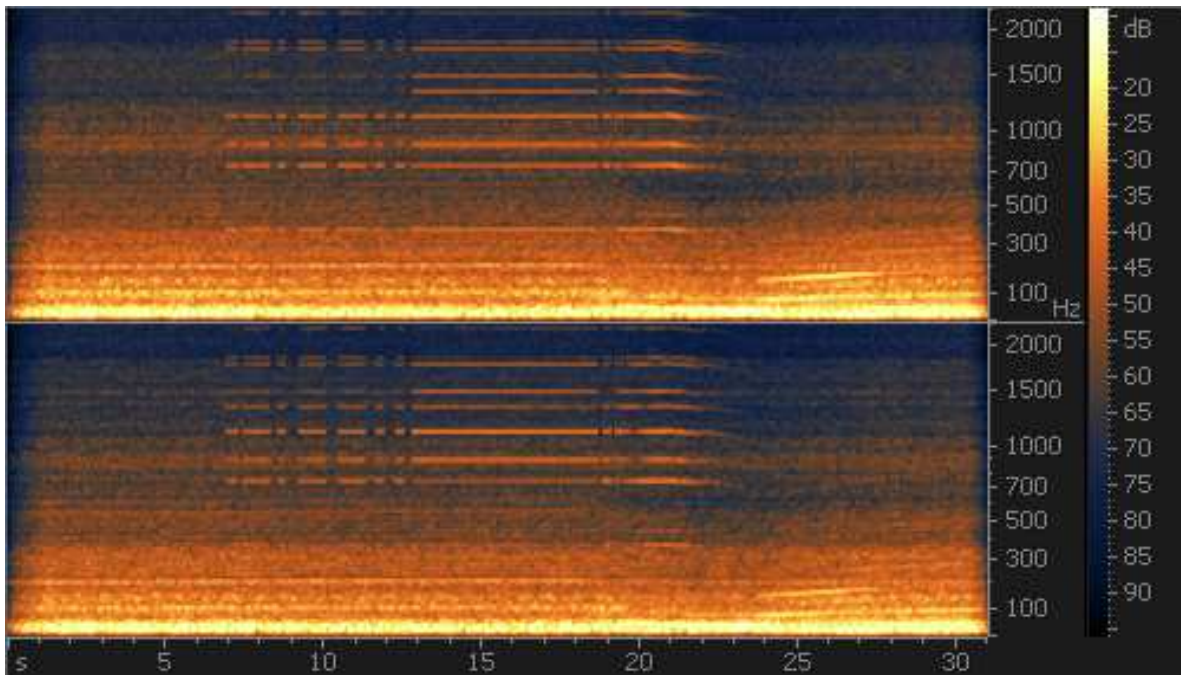


Abbildung 13: Spektrogramm der Autohupe

---

## Literaturverzeichnis

---

- [1] AEBERHART, M.; KÄMPCHEN, N.: High-Level Sensor Data Fusion Architecture for Vehicle Surround Environment Perception. In: *8th International Workshop on Intelligent Transportation* Bd. 8. Hamburg, 2011
- [2] AIDE: Driving performance assessment methods and metrics - Deliverable D2.2.5. 2004. – Forschungsbericht
- [3] AKTIV: Ergebnisse - Teilprojekt: Fahrsicherheit und Aufmerksamkeit / Audi AG, Bosch, Daimler, IZVW, Opel. 2011. – Forschungsbericht
- [4] ALLEN, T. M.; LUNENFELD, H.; ALEXANDER, G.J.: Driver Information Needs. In: *Highway Research Record*. 1971 ( 366)
- [5] ALPAYDIN, E.; LINKE, S. (Hrsg.): *Maschinelles Lernen*. Oldenbourg Verlag München, 2008
- [6] BACKHAUS, K.; ERICHSON, B.; PLINKE, W.; WEIBER, R.: *Multivariate Analysemethoden*. Springer, 2011
- [7] BADDELEY, A.: Working memory: Looking back and looking forward. In: *Nature Reviews Neuroscience* 4 (2003), S. 829–839
- [8] BEGAULT, D.: Head-Up Auditory Displays for Traffic Collision Avoidance System Advisories: A Preliminary Investigation. In: *Human Factors* 35 (1993), S. 707–717
- [9] BELLOTTI, F.; BERTA, R.; DE GLORIA, A.; MARGARONE, M.: Using 3D Sound to Improve the Effectiveness of the Advanced Driver Assistance Systems. In: *Personal and Ubiquitous Computing* 6 (2002), S. 155–163
- [10] BENGLER, K.; HERRLER, M.; KÜNZNER, H.: Usability Engineering bei der Entwicklung von iDrive. In: *it+ti - Informationstechnik und Technische Informatik* 44 (2002), S. 145–152

- [11] BISHOP, C.; JORDAN, M. (Hrsg.); KLEINBERG, J. (Hrsg.); SCHÖLKOPF, B. (Hrsg.): *Pattern Recognition and Maschine Learning*. Springer, 2006
- [12] BLAUERT, J.: *Räumliches Hören*. Hirzel-Verlag, 1974
- [13] BLAUERT, J.; ALLEN, J.; ED.), (Rev. (Hrsg.): *Spatial hearing: The psychophysics of human sound localization*. MIT Press (MA), 1996
- [14] BLOMBERG, C.: *Minimalsensorisches Konzept zur multimodalen Fahrerzustandsüberwachung auf Basis physiologischer Daten - Validierung einer neuen Methode*, Universität Paderborn, Diss., 2010
- [15] BMW: *Betriebsanleitung 7er BMW*. München: Bayerische Motoren Werke, 2011
- [16] BMW GROUP: *Audio System Overview*
- [17] BORTZ, J.: *Lehrbuch der Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler*. Berlin: Springer Verlag, 2005
- [18] BORYS, B.-B.: Unterstützung von Flugführungsaufgaben durch gerichtete Auditive Anzeigen. In: GRANT, M. (Hrsg.): *Entscheidungsunterstützung für die Fahrzeug- und Prozessführung*. Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt e.V., 2003, S. 41–52
- [19] BRAASCH, J.: *Auditory Localization and Detection in Multiple-Sound-Source Scenarios*, Ruhr-Universität Bochum, Diss., 2002
- [20] BRAES, H. H.: Aktive und passive Sicherheit im Straßenverkehr. In: *Zeitschrift für Verkehrssicherheit*. TÜV Media GmbH, 1996, S. 50–52
- [21] BRAESS, H.H.; DONGES, E.: Technologien zur aktiven Sicherheit von Personenkraftwagen - "Konsumierbare oder echte Verbesserung? In: *2. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz 2* (2006)
- [22] BREWSTER, S.: Non-speech auditory output. In: *Computer Interaction Handbook*. Mahwah, N., 2002
- [23] BROWN, I.: Review of the Looked but Failed to See Accident Causation Factor / Department for Transport: London. 2005. – Forschungsbericht
- [24] BUBB, H.: Fahrerassistenz primär ein Beitrag zum Komfort oder für die Sicherheit? In: *VDI-Bericht*, 2003 ( 1768), S. 25 – 44
- [25] BUBB, H.: Wie viele Probanden braucht man für allgemeine Erkenntnisse aus Fahrerexperimenten? In: *Fahrversuche mit Probanden - Nutzwert und Risiko*. VDI Reihe 12 (2003), Nr. 557
- [26] BÄUMLER, H.: Reaktionszeiten im Straßenverkehr Teil 1. In: *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik* Bd. 45. Vieweg Verlag, 2007
- [27] CARSTEN, O.: From Driver Models to Modelling the Driver: What Do We Really Need to Know About the Driver? In: (HRSG.), Cacciabue (Hrsg.): *Modelling Driver Behaviour in Automotive Environments*. Springer-Verlag Limited, 2007

- 
- [28] CUMMINGS, M. L.; KILGORE, R. M.; WANG, E.; KOCHHAR, D. S.: Effects of single versus multiple warnings on driver performance. In: *Human Factors* 49 (2007), Nr. 6, S. 1097–1106
- [29] DAHMEN-ZIMMER, K.; HUBER, M.; KAISER, I.; KOSTKA, M.; SCHEUFLER, I.; PIECHULLA, W.; PRAXENTHALER, M.; ZIMMER, A.: Definition und Validierung von Kriterien für die Ablenkungswirkung von MMI-Lösungen. In: *Endbericht Motiv-Teilprojekt MMI AP/5.*, 1999
- [30] DELL, W.: *The Use of 3D Audio to Improve Auditory Cues in Aircraft*, University of Glasgow, Dissertation, 2000
- [31] DICKREITER, M.; DITTEL, V.; HOEG, W.; WÖHR, M.; MEDIENAKADEMIE, ARD Z. (Hrsg.): *Handbuch der Tonstudioteknik*. Bd. 7. K. G. Sauer Verlag, 2008
- [32] DIEDERICH, A.; COLONIUS, H.: Bimodal and trimodal multisensory enhancement: Effects of stimulus onset and intensity on reaction time. In: *Perception & Psychophysics* 66 (2004), Nr. 8, S. 1388–1404
- [33] DONGES, E.: Aspekte der aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen. In: *Automobil-Industrie*. 1982
- [34] DONGES, E.: Fahrerverhaltensmodelle. In: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Winner, Hermann and Hakuli, Stephan and Wolf, Gabriele (Hrsg.), 2009
- [35] DORSCH, F.; HÄCKER, H.; STAPF, K.; DORSCH, F. (Hrsg.): *Dorsch Psychologisches Wörterbuch*. Bern, Stuttgart, Toronto: Hans Huber Verlag, 1987. – S. 737–738
- [36] ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE: Guidelines on establishing requirements for high-priority warning signals. In: *World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations* Bd. ECE/TRANS/WP.29/2011/90, 2011
- [37] EHEMANN, D.; AULBACH, J.; STROBEL, T.; MAYSER, C.; KOPF, M.; DISCHER, C.; FISCHER, J.; OSZWALD, F.; ORECHER, S.: Aktive Sicherheit und Fahrerassistenz. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift Ausgabe Der neue BMW 7er Ausgabe Nr.: 2008-08* (2008)
- [38] EHMANN, D.: *Modellierung des taktischen Fahrerverhaltens bei Spurwechselvorgängen.*, RWTH Aachen, Diss., 2002
- [39] EHMANN, D.; WALLENTOWITZ, H.; GELAU, C.; NICKLISCH, F.: Zukünftige Entwicklungen von Fahrerassistenzsystemen und Methoden zu deren Bewertung. In: *Aachener Kolloquium Fahrzeug und Motorentechnik*, 2000
- [40] EICHBERGER, A.; TOMASCH, E.; HIRSCHBERG, W.; STEFFAN, H.: Potenziale von Systemen der aktiven Sicherheit und Fahrerassistenz. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift Ausgabe Ausgabe Nr.: 2011-08* (2011)
- [41] ENDSLEY, M.: Design and evaluation for situation awareness enhancement. In: *Proceedings of the Human Factors Society 32nd Annual Meeting* Bd. 1, 1988, S. 97–101

- [42] ERGONEERS GMBH: *Plan, measure, analyse ... Dikablis, D-Lab overview*. Version: 2012. <http://www.ergoneers.com/de/products/dlab-dikablis/overview.html>, Abruf: 07.04.2012. Internet
- [43] FAGERLÖNN, J.: Making Auditory Warning Signals Informative: Examining the Acceptance of Auditory Icons as Warning Signals in Trucks. In: *Proceedings of the Sixth International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design.*, 2011
- [44] FASTENMEIER, W.; HINDERER, J.; LEHNING, U.; GSTALTER, H.: Analyse von Spurwechselforgängen im Verkehr. In: *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft* 1 (2001), S. 15–23
- [45] FASTL, H.; ZWICKER, E.: *Psychoacoustics - Facts and Models*. Springer Verlag, 2007
- [46] FITCH, G.; KIEFER, R.; HANKEY, J.; KLEINER, B.: Toward Developing an Approach for Alerting Drivers to the Direction of a Crash Threat. In: *Human Factors and Ergonomics Society* Bd. 49 (2007), Nr. Nr. 4, S. 710–720
- [47] FREYER, J.; WINKLER, L.; HELD, R.; SCHUBERTH, S.; KHLIFI, R.; POPKEN, M.: Assistenzsysteme für die Längs- und Querführung. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift Ausgabe Der neue Audi A6 Ausgabe Nr.: 2011-01* (2011)
- [48] FRICKE, N.: *Gestaltung zeit- und sicherheitskritischer Warnungen im Fahrzeug*, TU Berlin, Dissertation, 2009
- [49] FRICKE, N.; FILIPPIS, M.; THÜRING, M.: Wie beurteilt man sicherheitskritische Fahrerassistenzsysteme? Darstellung einer Fahrsimulatorstudie, 2008
- [50] FROHNE, H.; LÖCHERER, K.H.; MÜLLER, H.; HARRIEHAUSEN, T.; SCHWARZENAU, D.: *Moeller Grundlagen Der Elektrotechnik*. Vieweg+Teubner Verlag, 2011. – ISBN 9783834808981
- [51] FUERSTENBERG, K.; HOPSTOCK, M.; ANDRZEJ, O.: *Evaluation and Effectiveness of the Intersection Safety System*.. – Deliverable 40.75. INTERSAFE Final Report, 2007
- [52] GASSER, T.: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. In: *Fahrzeugtechnik, Heft F 83*. BAST, 2012
- [53] GDV, Gesamtverband der deutschen Schadenversicherer e.V./Gesamtverband der deutschen Schadenversicherer e.V.: *Unfalltypenkatalog: Leitfaden zur Bestimmung des Unfalltyps*. Version: 1998. [http://www.udv.de/uploads/tx\\_udvpublications/unfalltypenkatalog\\_lr.pdf](http://www.udv.de/uploads/tx_udvpublications/unfalltypenkatalog_lr.pdf), Abruf: 15.12.2011. Internet
- [54] GEISER, G.: Mensch-Maschine-Kommunikation im Kraftfahrzeug. In: *ATZ*, 1985 (87(2)), S. 74–77
- [55] GELAU, C.; BAUER, A.: What do accident data tell about drivers needs for assistance. In: *First Conference on Drivers Needs*. Lissabon, 2004



- 
- [56] GIJSSEL, A.; KÜNZNER, H.; ECKSTEIN, L.; RIDDER, H.; CHRISTIAANS, H.: Ressourcenschonende Anzeigengestaltung für antizipatives Fahren. In: *ATZelektronik* 3 (2008), Nr. 7467, S. 20–24
- [57] GOLDSTEIN, E. B.: *Wahrnehmungspsychologie*. Bd. 2. dt. Auflage. Heidelberg, Berlin: Spektrum Akademischer Verlag, 2002
- [58] GRATZER, W.: Informationsaufnahme beim Kraftfahrer. In: *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*. Springer Verlag, 2007
- [59] GREEN, M.: How Long Does It Take to Stop? Methodological Analysis of Driver Perception-Brake-Times. In: *Human Factors* 2 (2000), Nr. 3, S. 195–216
- [60] GRIESER, G.: *Entscheidungsbaum-Lernen: Übersicht*. Version: 2004. <http://www.ke.tu-darmstadt.de/lehre/archiv/ws0405/mldm/dt.pdf>, Abruf: 20.02.2013. Internet
- [61] GRÜNDL, M.: *Fehler und Fehlverhalten als Ursache von Verkehrsunfällen und Konsequenzen für das Unfallvermeidungspotenzial und die Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen*. Regensburg, Universität Regensburg, Dissertation, 2005
- [62] GWEHENBERGER, J.; KUBITZKI, J.; BEHL, T.: Sicherheitsgewinn durch Fahrerassistenzsysteme: Aktuelle Erkenntnisse aus Schadenakten der Allianz. In: *4. Tagung Sicherheit durch Fahrerassistenz*. München, 2010
- [63] HAVEIT: Report on driver assessment methodology - Deliverable D32.1 / Continental Automotive GmbH. 2007. – Forschungsbericht
- [64] HENDERSON, J. M.: Human gaze control during real-world scene perception. In: *TRENDS in Cognitive Sciences* 7 (2003), Nr. 11, S. 498–504
- [65] HENDERSON, R. L.: Driver Performance Data Book / National Highway Traffic Safety Administration. 1986 (DOT 807126). – Forschungsbericht
- [66] HO, A.; CUMMINGS, M.: Multiple alarms and driving situational awareness. In: *Cambridge: MIT, Department of Aeronautics and Astronautics HAL2005-01* (2005)
- [67] HO, C.; SPENCE, C.: Assessing the Effectiveness of Various Auditory Cues in Capturing a Drivers Visual Attention. In: *Journal of Experimental Psychology* 11 (2005), Nr. 3, S. 157–174
- [68] HO, C.; SPENCE, C.: Using peripersonal warning signals to orient a drivers gaze. In: *Human Factors* 51 (2009), S. 539–556
- [69] HOCH, S.: *Kontextmanagement und Wissensanalyse im kognitiven Automobil der Zukunft*, TU München, Dissertation, 2008
- [70] HOFFMANN, J.: *Das Darmstädter Verfahren (EVITA) zum Testen und Bewerten von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen*, TU Darmstadt, Dissertation, 2008

- [71] HOFFMANN, J.; WINNER, H.: Bewertung von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen durch das Darmstädter Test- und Bewertungsverfahren mit EVITA. In: *VDI - Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenz*. Wolfsburg, Oktober 2008, S. 29–31
- [72] HORREY, W. J.; WICKENS, C. D.; CONSALUS, K. P.: Modeling drivers visual attention allocation while interacting with in-vehicle technologies. In: *Journal of Experimental Psychology: Applied* 12(2) (2006), S. 67–78
- [73] HOWARTH, C.; TREISMAN, M.: The effect of warning interval on the electric phosphene and auditory thresholds. In: *Quarterly Journal of Experimental Psychology* 10 (1958), S. 130–141
- [74] HUNZIKER, H.: *Magie des Hörens: Unbewusste Strategien der Hörwahrnehmung*. Transmedia Stäubli Verlag AG, 2011
- [75] HUSSY, W.; JAIN, A.: *Experimentelle Hypothesenprüfung in der Psychologie*. Hogrefe-Verlag, 2002
- [76] ISO15006: *Ergonomic aspects of in vehicle auditory presentation for transport information and control systems Specifications and Compliance procedures*. 2001
- [77] ISO15008: *Straßenfahrzeuge - Ergonomische Aspekte von Fahrerinformations- und Assistenzsystemen - Anforderungen und Bewertungsmethoden der visuellen Informationsdarstellung im Fahrz*. 2002
- [78] JAMES, W.: *Principles of Psychology*., - Zitiert nach Benjamin T. (Dissertation: Videogestützte Überwachung der Fahreraufmerksamkeit und Adaption von Fahrerassistenzsystemen, TU Ilmenau, Dissertation, 1980
- [79] JOHANSSON, G.; RUMAR, K.: Drivers brake reaction times. In: *Human Factors* 13 (1971), S. 23–27
- [80] JÜRGENSOHN, T.: *Hybride Fahrermodelle*., TU Berlin, Dissertation, 1997
- [81] JÜRGENSOHN, T.; TIMPE, K. P.: *Kraftfahrzeugführung*. Berlin: Springer, 2001
- [82] KAHNEMAN, D.: *Attention and Effort*. Englewood Cliffs, 1973
- [83] KANDEL, E.R.; SCHWARTZ, J.H.; JESSELL, T.M.: *Principles of neural science*. McGraw-Hill, Health Professions Division, 2000
- [84] KARNATH, H. O.; THIER, P.: *Neuropsychologie*. Bd. 2. Heidelberg: Springer-Verlag, 2003
- [85] KATES, R.: *Modellierung von Reaktionsprozessen im Rahmen der Assistenzfunktion Aktive Gefahrenbremsung (AKTIV-AGB)*. 2007. – Interner Bericht
- [86] KEPPEL, G.: , zitiert nach: R. Vilimek (Dissertation), *Design and analysis: A researchers handbook*. Bd. 3. NJ: Prentice Hal, 1991

- 
- [87] KINGBRIGHT: *Datenblatt: Spezial-LED Rot Gehäuseart 5 mm Betriebsspannung 5 V*. Version: 2012. [http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/175000-199999/182427-da-01-en-LED\\_5MM\\_L\\_53ID\\_5V\\_ROT.pdf](http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/175000-199999/182427-da-01-en-LED_5MM_L_53ID_5V_ROT.pdf), Abruf: 08.04.2012. Internet
- [88] KNAPPE, G.: *Empirische Untersuchungen zur Querregelung in Fahrsimulatoren. Vergleichbarkeit von Untersuchungsergebnissen und Sensitivität von Messgrößen.*, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Diss., 2009
- [89] KÖNIG, W.; MUTSCHLER, H.: MMI of warning systems in vehicles / Working group ISO/TC204/WG8. 2003. – Forschungsbericht
- [90] KOHAVI, R.; QUINLAN, R.: *Decision Tree Discovery.*, 1999
- [91] KOMPASS, K.; GRUBER, C.; DOMSCH, C.: Der Beitrag von Fahrerassistenzsystemen zur Aktiven und Passiven Sicherheit - die Integrale Sicherheit als Antwort auf die wachsenden Anforderungen an die Fahrzeugsicherheit. In: *4. Tagung Sicherheit durch Fahrerassistenz*. München, 2010
- [92] KOPF, M.: *Ein Beitrag zur modellbasierten, adaptiven Fahrerunterstützung für das Fahren auf deutschen Autobahnen*, Universität der Bundeswehr München, Dissertation, 1993
- [93] KOPF, M.: *Warnungen und ihre Auswirkungen auf den Fahrer*. 1998. – Zitiert nach: König W. ; Mutschler H. "MMI of warning systems in vehicles"(2003)
- [94] KOPF, M.: Was nützt es dem Fahrer, wenn Fahrerinformations- und -assistenzsysteme etwas über ihn wissen? In: *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*. Maurer, Markus and Stiller, Christoph (Hrsg.), 2005
- [95] KRAUZLIS, M.; LISBERGER, A.: *Neurophysiologie*. 1994
- [96] KRENGEL, U.: *Einführung in die Wahrscheinlichkeitstheorie und Statistik..* Bd. 8. Wiesbaden: Vieweg & Sohn Verlag / GWD Fachverlage GmbH, 2005
- [97] KRÜGER, H. P.; RAUCH, N.; SCHOCH, S.: Ermittlung von Fahreraufmerksamkeit aus Fahrverhalten, 2007
- [98] KUHN-RAHLOFF, C.; NEUKOM, M.; OECHSLIN, M.: The Doppler Effect in Warning Signals: Perceptual Investigations into Aversive Reactions Related to Pitch Changes. In: *Forum Acusticum*. Denmark, 2001
- [99] LAAN, J.; HEINO, A.; DICK, W.: A simple procedure for the assessment of acceptance of advanced transport telematics. In: *Transpn Res* 5 (1997), S. 1–10
- [100] LEE, J.; HOFFMAN, J.; HAYES, E.: Collision Warning Design to Mitigate Driver Distraction. In: *Computer Human Interaction (CHI)*. (2004), S. 65–72
- [101] LERMER, R.: *Konzeption und Bewertung eines fahrsituations- und fahrerleistungsadaptiven Warn- und Informationsmanagers*, Universität der Bundeswehr München, Dissertation, 2009

- [102] LINDBERG, T.: *Entwicklung einer ABK-Metapher für gruppierte Fahrerassistenzsysteme*. Berlin, TU Berlin, Dissertation, Oktober 2011
- [103] LORENZ, L.: *Offenlegungsschrift: Fahrzeug mit einer Vorrichtung zur Beeinflussung der Aufmerksamkeit und zur Ermittlung der Bediensicherheit, DE102011083836A1*. 2013
- [104] LORENZ, L.: *Offenlegungsschrift: Fahrzeug mit einer Vorrichtung zur Beeinflussung der Aufmerksamkeit und zur Ermittlung der Blickrichtung des Fahrers, DE102011083833A1*. 2013
- [105] LORENZ, L.; LINDBERG, T.: *Offenlegungsschrift: Kraftfahrzeug mit einer Vorrichtung zur Beeinflussung der Blickrichtung des Fahrers, DE102010041961A1*. 2012
- [106] MAGES, M.; WINNER, H.; HOPSTOCK, M.: Aktive Sicherheit durch Kreuzungsassistenten. Erkennung von Gefahrensituationen, Auswahl von Warnstrategien und Ableitung von Sensoranforderungen. In: *VDI-Tagung Fahrer im 21. Jahrhundert*, 2007
- [107] MAIER, K.; SACHER, H.; HELLBRÜCK, J.: A first step towards an integrated warning approach. In: *3rd International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*, 2010
- [108] MAMMAR, S.; GLASER, S.; NETTO, M.: Time to Line Crossing for Lane Departure Avoidance: A Theoretical Study and an Experimental Setting. In: *IEEE 7* (2006), Nr. 2, S. 226–241
- [109] MANN, M.: *Benutzerorientierte Entwicklung und fahrgerechte Auslegung eines Querführungsassistenten*, TU München, Dissertation, 2007
- [110] McDONALD, J.; TEDER-SALEJARVI, W.; HILLYARD, S.: Involuntary orienting to sound improves visual perception. In: *Nature* 407 (2000), S. 906–908
- [111] MCGEHEE, D. V.; BROWN, T. L.; LEE, J. L.; WILSON, T. B.: Effect of warnings in collision avoidance behavior in a stationary lead vehicle scenario. In: *Transportation Research Record* 1 (2002), Nr. 1803, S. 1–6
- [112] METZ, B.: *Worauf achtet der Fahrer? Steuerung der Aufmerksamkeit beim Fahren mit visuellen Nebenaufgaben.*, Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Diss., 2009
- [113] MILICIC, N.: *Sichere und ergonomische Nutzung von Head-Up Displays im Fahrzeug*, TU München, Dissertation, 2009
- [114] MÜLLER, S.: *Verfahren zur akustischen Anzeige einer Gefahrenquelle in der Umgebung eines Fahrzeugs, insbesondere eines Kraftfahrzeugs*. 2009
- [115] NAUJOKS, F.; GRATTENTHALER, H.; NEUKUM, A.: Zeitliche Gestaltung effektiver Fahrerinformationen zur Kollisionsvermeidung auf der Basis kooperativer Perzeption. In: *8. Workshop Fahrerassistenzsysteme*, 2012
- [116] NAUJOKS, F.; NEUKUM, A.: *Alternative Informations- und Warnkonzepte*. 2012. – Unveröffentlicher Bericht im Forschungsprojekt Ko-FAS

- 
- [117] NEES, A.; WALKER, B.: Auditory Displays for In-Vehicle Technologies. In: *Human Factors* 7 (2011), S. 58–99
- [118] NHTSA: The 100 -Car Naturalistic Driving Study, Phase II - Results of the 100-Car Field Experiment / National Highway Traffic Safety Administration. 2006 (DOT HS 810 593). – Ergebnisbericht
- [119] NORM: Road vehicles - Ergonomic aspects of transport information and control systems - Simulated lane change test to assess in-vehicle secondary task demand. 2005 (ISO / DIS 26022). – Forschungsbericht
- [120] NORM, O.; SCOTT, A.; CHRIS, E.; L., Scott: Guidelines for Jury Evaluations of Automotive Sounds. In: *SOUND AND VIBRATION* (2001), S. 1–14
- [121] OLSON, P.; SIVAK, M.: Perception-Response Time to Unexpected Roadway Hazards. In: *Human Factors* 28 (1986), Nr. 1, S. 91–96
- [122] OSKARSSON, P.; ERIKSSON, L.; CARLANDER, O.:
- [123] OTTENSMEYER, H. U.: Einfluss der Geschwindigkeit auf das Unfallgeschehen im Straßenverkehr. In: *Unfall und Fahrzeugtechnik* 9 (1985), S. 1–8
- [124] PEAK SYSTEM: *PCAN-MicroMod Evaluation Kit*. Version: 2012. [http://www.peak-system.com/Produktdetails.49+M59fafefe52e.0.html?&tx\\_commerce\\_pi1%5BcatUid%5D=8&tx\\_commerce\\_pi1%5BshowUid%5D=26](http://www.peak-system.com/Produktdetails.49+M59fafefe52e.0.html?&tx_commerce_pi1%5BcatUid%5D=8&tx_commerce_pi1%5BshowUid%5D=26), Abruf: 08.04.2012. Internet
- [125] PLAUSIC, M.; BUBB, H.; DUSCHL, M.; TÖNNIS, M.; KLINKER, G: Ergonomic Design and Evaluation of Augmented Reality Based Cautionary Warnings for Driving Assistance in Urban Environments, 2009
- [126] POITSCHKE, T.; LAQUAI, F.; RIGOLL, G.: Guiding a Drivers Visual Attention Using Graphical and Auditory Animations. In: HARRIS, D. (Hrsg.): *Engin. Psychol. and Cog. Ergonomics*, 2009
- [127] POPKEN, A.; KREMS, F.: Drivers Reliance on lane keeping assistance systems: Effects of different levels of assistance. In: *Proceedings of European Conference on Human Centred Design for Intelligent Transport Systems*, 2008
- [128] PRAXENTHALER, M.: *Experimentelle Untersuchung zur Ablenkungswirkung von Sekundäraufgaben während zeitkritischer Fahrsituationen*, Universität Regensburg, Dissertation, 2003
- [129] PREVIC, F.: The Neuropsychology of 3-D Space. In: *Psychological Bulletin* 124 (1998), S. 123–164
- [130] PUDENZ, K.: *Volkswagen zeigt Assistenzsysteme für Kreuzungen*. Version: 2012. <http://www.atzonline.de/Aktuell/Nachrichten/1/13823/Volkswagen-zeigt-Assistenzsysteme-fuer-Kreuzungen.html>, Abruf: 10.12.2012. ATZ - Online

- [131] RASCH, B.; FRIESE, M.; HOFFMANN, W.; NAUMANN, H.: *Quantitative Methoden 1 & 2*. Bd. 3. Springer-Verlag, 2010
- [132] RASMUSSEN, J.: Skills, Rules, and Knowledge; Signals, Signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. In: *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*,, 1983 ( Nr. 15), S. 234–243
- [133] RASSL, R.: *Ablenkungswirkung tertiärer Aufgaben im Pkw - Systemergonomische Analyse und Prognose*, TU München, Dissertation, 2004
- [134] RAUCH, N.; GRADENEGGER, B.; KRÜGER, H. P.: Das Konzept des Situationsbewusstseins und seine Implikationen auf die Fahrsicherheit. In: *FAT-Schriftenreihe* 210 (2009), S. 70 – 105
- [135] RAUCH, N.; SCHOCH, S; KRÜGER, H. P.: Ermittlung von Fahreraufmerksamkeit aus Fahrverhalten / Institut für Verkehrswissenschaften WIVW Würzburg. 2007. – BMWi Projekt AKTIV-AS- Teilprojekt FSA Ergebnisbericht
- [136] RAVILIOUS, K.: *Humans Can Learn to SSee"With Sound, Study Says*. Version: 2009. <http://news.nationalgeographic.com/news/2009/07/090706-humans-bats-echolocation.html>, Abruf: 23.06.2012. Internet
- [137] REICHART, G.; HALLER, R.: Mehr aktive Sicherheit durch neue Systeme für Fahrzeug und Straßenverkehr. In: *Autofahrer und Verkehrssituation: Neue Wege zur Bewertung von Sicherheit und Zuverlässigkeit moderner Straßenverkehrssysteme*. Fastenmeier, W. (Hrsg.),, 1995
- [138] REIF, Konrad (Hrsg.): *Fahrstabilisierungssysteme und Fahrerassistenzsysteme*. 1. Auflage. Wiesbaden: Vieweg & Teubner Verlag, 2010. – 107–116 S.
- [139] REINISCH, P.: *Entwicklung einer risikoadaptiven Eingriffsstrategie für ein Gefahrenbremssystem*, Universität Duisburg-Essen, Dissertation, 2012
- [140] RENNER, G.: *Fahrzeugführung unter kognitiver Belastung - eine Simulationsstudie*, RWTH Aachen, Dissertation, 1995
- [141] RHEDE, J.; WÄLLER, C.; OEL, P.: Der FAS Warnbalken. In: *Der Fahrer im 21. Jahrhundert (VDI-Berichte)*, 2011 ( 2134)
- [142] ROBINSON, D. A.: Control of eye movements. In: *Handbook of Physiology*. Williams & Wilkins, 1981
- [143] RÖSLER, D.: *Fahrrelevanz von Elementen des Straßenverkehrs - Beschreibung, Erfassung und Anwendung*, TU Chemnitz, Diss., 2009
- [144] SACHER, H.: *Gesamtheitliche Analyse des Bedienverhaltens von Fahrzeugfunktionen in der täglichen Nutzung*, TU München, Dissertation, 2009
- [145] SARTER, N.B.; WOODS, D. D. zitiert nach Damböck D. ; Weißgerber T.: 2012 BMW interner Bericht :: Situation Awareness: A critical but ill-defined phenomenon. In: *International Journal of Aviation Psychology* 1 (1991), S. 45–57

- 
- [146] SCHLICK, C.; BRUDER, R.; LUCZAK, H.: *Arbeitswissenschaft*. Bd. 3. Berlin: Springer Verlag, 2010
- [147] SCHLIEP, F.: Frei programmierbares Projektions-Kombiinstrument. In: *ATZelektronik* Nr.: 2006-03 (2006)
- [148] SCHLOTT, Stefan: *Berliner Erklärung zur Fahrzeugsicherheit legt Fokus auf aktive Sicherheitssysteme*. Version: Oktober 2011. <http://www.atzonline.de/Aktuell/Nachrichten/1/14643/>, Abruf: 16.12.2011. Internet
- [149] SCHMIDGE, H.: *Ergonomie*. Bd. 3. München Wien: Carl Hanser Verlag, 1993
- [150] SCHNEID, M.: *Entwicklung und Erprobung eines kontaktanalogen Head-up-Displays im Fahrzeug*, TU München, Dissertation, 2009
- [151] SCHRÖDER, Caterina: *Neue Assistenzsysteme für den 5er BMW*. Version: 26. November 2009. <http://www.atzonline.de/Aktuell/Nachrichten/1/10934/Neue-Assistenzsysteme-fuer-den-5er-BMW.html>, Abruf: 26.04.2011
- [152] SCHULZ, R.: *Blickverhalten und Orientierung von Kraftfahrern auf Landstraßen*, Technische Universität Dresden, Diss., 2012
- [153] SCHWARZ, J.: Code of Practice for development, validation and market introduction of ADAS. In: *5th European Congress on ITS - Technical Session 44 "Preventive Safety and Accident Avoidance"*, 2005
- [154] SCHWEIGERT, M.: *Fahrerblickverhalten und Nebenaufgaben*, TU München, Dissertation, 2003
- [155] SMITH, K.; HANCOCK, P. A.: Situation awareness is adaptive, externally directed consciousness. In: *Human Factors* 37 (1995), S. 137–148
- [156] SONNLEITNER, A.: *Die physiologische Erfassung des Fahrerzustandes: Der Einfluss von Unaufmerksamkeit des Fahrers auf EEG Parameter und Verhaltensdaten*, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, Diss., 2012
- [157] SORKIN, R. D.: Why are people turning off our alarms? In: *Journal of the Acoustic Society of America* 84 (1988), Nr. 3, S. 1107–1108
- [158] SPENCE, C.; HO, C.: Multisensory warning signals for event perception and safe driving. In: *Theoretical Issues in Ergonomics Science* 9 (2008), Nr. 6, S. 523–554
- [159] SPIEGEL ONLINE: *Überraschungsabbieger: Jeder dritte Autofahrer blinkt nicht*. Version: 2007. <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/0,1518,470624,00.html>, Abruf: 31.03.2012. Internet
- [160] STATISTISCHES BUNDESAMT: *Verkehr 2011*. 2012
- [161] STOZMANN, W.; SOKOLL, A.; PRÖTTEL, A.: Reaktionszeitdifferenzen bei aufmerksamen und abgelenkten Fahrern. In: *4. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz*, 2010

- [162] SYSTEME, Universität Paderborn Fachgebiet W.: *Vorlesungsskript Maschinelles Lernen*. Version: 2008. <http://www2.cs.uni-paderborn.de/cs/ag-klbue/de/courses/ss08/gwbs08/ID3-lernen.pdf>, Abruf: 20.02.2013. Internet
- [163] THOMA, S.: *Mensch-Maschine-Interaktionskonzepte für Fahrerassistenzsysteme im Kreuzungsbereich*, TU München, Dissertation, 2010
- [164] TIJERINA, L.: , zitiert nach HAVEit (Highly automated vehicles for intelligent transport) Deliverable D32.1, Issues in the evaluation of driver distraction associated with invehicle information and telecommunications systems. / NHTSA. 2000. – Forschungsbericht
- [165] TREFFLICH, B.; MOTTOK, J.; SCHICHTL, R.: Fahreradaptives ACC - Adaption von ACC Warnungen an die Fahreraufmerksamkeit. In: *24. VDI/VW-Gemeinschaftstagung 2008 - Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme.*, 2008 ( VDI-Berichte Nr. 2048)
- [166] TSIMHONI, O.; GREEN, P.: Visual demand of driving and the execution of display-intensive in-vehicle tasks. In: *45th annual meeting of the Human Factors and Ergonomics Society*, 2001
- [167] ULLMAN, D. G.: *Making Robust Decisions*. Bd. 1. Trafford Publishing, 2006
- [168] VAN WINSUM, W.; DEWAARD, D.; K., Brookhuis: Lane change manoeuvres and safety margins. In: *Traffic Psychology and Behaviour 2* (1999), S. 139–149
- [169] VICTOR, T.: *Keeping eye and mind on the road*, Universität Uppsala, Diss., 2005
- [170] VITENSE, H.; JACKO, J.; EMERY, V.: Multimodal feedback: An assessment of performance and mental workload. In: *Ergonomics* 46 (2003), S. 68–87
- [171] WEINZIERL, S.: *Handbuch Der Audiotechnik*. Springer, 2008. – ISBN 9783540343004
- [172] WERLING, M.: *Ein neues Konzept für die Trajektoriengenerierung und -stabilisierung in zeitkritischen Verkehrsszenarien*, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Dissertation, 2010
- [173] WERNER, U.: *Schallschutz und Raumakustik: Handbuch für Theorie und Baupraxis*. Beuth Verlag, 2009
- [174] WERTHEIMER, R.; KLANNER, F.: Cooperative Perception to Promote Driver Assistance and Preventive Safety. In: *8th International Workshop on Intelligent Transportation*. Hamburg, 2011
- [175] WICKENS, C. D.: *Engineering Psychology and Human Performance*. Bd. 2. Harper Collins, 1992
- [176] WIKMAN, A.-S.; NIEMINEN, T.; SUMMALA, H.: Driving experience and time-sharing during in-car tasks on roads of different width. In: *Ergonomics* 41(3) (1998), S. 358–372



- 
- [177] WILLE, M.; RICHTER, H.: *Das Netzwerk für das Auto von morgen*. Version: November 2006. [http://www.elektroniknet.de/automotive/technik-know-how/bussysteme/article/90/0/Das\\_Netzwerk\\_fuer\\_das\\_Auto\\_von\\_morgen/](http://www.elektroniknet.de/automotive/technik-know-how/bussysteme/article/90/0/Das_Netzwerk_fuer_das_Auto_von_morgen/), Abruf: 12.12.2011
- [178] WILTSCHKO, T.: *Sichere Information durch infrastrukturgestützte Fahrerassistenzsysteme zur Steigerung der Verkehrssicherheit an Straßenknotenpunkten*, Universität Stuttgart, Dissertation, 2003
- [179] WINNER, Hermann (Hrsg.); HAKULI, Stephan (Hrsg.); WOLF, Gabriele (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. 1. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2009
- [180] WINTERHAGEN, J.: *Das Auto, das mehr weiß als der Fahrer*. Version: September 2011. <http://www.atzonline.de/Aktuell/Nachrichten/1/14617/Das-Autokomma-das-mehr-weiss-als-der-Fahrer.html>, Abruf: 13.12.2011. Internet
- [181] WISSELMANN, D.; GRESSER, K.; HOPSTOCK, M.; HUBER, W.: Präventiver statt passiver Fußgängerschutz. In: *10. Braunschweiger Symposium AAET* Bd. 10. Braunschweig, 2009
- [182] WORKING GROUP ON INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEMS (ITS): Statement of Principles on the Design of High-Priority Warning Signals for In-Vehicle Intelligent Transport Systems / International Harmonized Research Activities (IHRA). 2008. – Forschungsbericht
- [183] YANTIS, S.; JONIDES, J. zitiert nach: U. A.: Die Rolle von Absichten bei der automatischen Verarbeitung visuell-räumlicher Reizinformation. In: *Psychologische Rundschau* 57 (1984), Nr. 1, S. 2–12
- [184] YOUNG, K.; REGAN, M.: Driver distraction: A review of the literature. In: *Distracted driving*. Sydney: Faulks, I.J. and Regan, M and Stevenson, M. and Brown, J. and Porter, A. and Irwin, J.D. (Hrsg.), 2007
- [185] ZAHORIKA, p.: Assessing auditory distance perception using virtual acoustics. In: *The Journal of Acoustical Society of America* 111 (2002), S. 1832–1846
- [186] ZIMMER, A.: Wie intelligent darf/muss ein Auto sein? Anmerkungen aus ingenieurpsychologischer Sicht. In: JÜRGENSOHN, Thomas (Hrsg.); TIMPE, Klaus-Peter (. (Hrsg.): *Kraftfahrzeugführung*. Springer, 2001
- [187] ZIMMER, A.; DAHMEN-ZIMMER, K.: Sicherheitskenngrößen im Straßenverkehr. In: *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen* Bd. Heft M 78. Bergisch Gladbach, 1997