

---

# **Frühzeitige Fahrerinformationen zur Konfliktvermeidung bei urbanen Verkehrskonflikten**

Gestaltung und Absicherung

---

**Inaugural-Dissertation**

**zur Erlangung der Doktorwürde  
der Fakultät für Humanwissenschaften  
der Julius-Maximilians-Universität  
Würzburg**

vorgelegt von  
Frederik Naujoks  
aus Pforzheim  
Würzburg 2015

Erstgutachterin: Prof. Dr. Andrea Kiesel  
Zweitgutachter: Prof. Dr. Wilfried Kunde  
Tag des Kolloquiums: 10.07.2015

# Inhaltsverzeichnis

Danksagung .....	6
<b>1 Kurzfassung .....</b>	<b>7</b>
<b>2 Hintergrund und Motivation der Arbeit .....</b>	<b>9</b>
2.1 Fahrerunterstützung durch kooperative Umfelderkennung .....	9
2.2 Forschungsgegenstand: Frühzeitige Fahrerinformationen .....	11
2.3 Problemanalyse: Möglichkeiten frühzeitiger Fahrerunterstützung .....	12
2.4 Grenzen kooperativer Umfelderkennung .....	14
2.5 Zusammenfassung .....	15
<b>3 Theoretischer Hintergrund .....</b>	<b>17</b>
3.1 Zeitfenster für effektive Fahrerinformationen .....	17
3.1.1 Grundlagenorientierte Arbeiten .....	17
3.1.2 Angewandte Arbeiten .....	18
3.2 Informationsinhalt .....	21
3.2.1 Grundlagenorientierte Arbeiten .....	21
3.2.2 Angewandte Arbeiten .....	24
3.3 Informationsmodalität .....	33
3.3.1 Grundlagenorientierte Arbeiten .....	33
3.3.2 Angewandte Arbeiten .....	35
3.4 Systemgrenzen und -fehler .....	37
3.4.1 Grundlagenorientierte Arbeiten .....	38
3.4.2 Angewandte Arbeiten .....	39
3.4.3 Fehlerhafte Warnausgaben .....	44
3.5 Zusammenfassung: Prototypische Fahrerunterstützung .....	46
3.5.1 Zeitpunkt .....	46
3.5.2 Spezifität .....	46
3.5.3 Dringlichkeit .....	47
<b>4 Studie I: Zeitfenster frühzeitiger Fahrerinformationen .....</b>	<b>48</b>
4.1 Fragestellung .....	48
4.2 Methodik .....	48
4.2.1 Versuchsumgebung .....	48
4.2.2 Art der Fahrerunterstützung .....	49
4.2.3 Versuchsdesign .....	51
4.2.4 Versuchssituationen .....	52
4.2.5 Häufigkeit der Informationsdarbietung .....	55
4.2.6 Abhängige Variablen .....	55
4.2.7 Stichprobe .....	58
4.2.8 Versuchsablauf .....	59

<b>4.3</b>	<b>Ergebnisse</b> .....	<b>59</b>
4.3.1	Vorgehen bei der Ergebnisdarstellung .....	59
4.3.2	Missings.....	60
4.3.3	Anteil kritischer Begegnungen.....	60
4.3.4	Vergleich früher und später Informationszeitpunkte.....	62
4.3.5	Subjektive Beurteilung des Informationszeitpunkts.....	67
<b>4.4</b>	<b>Diskussion</b> .....	<b>69</b>
4.4.1	Zusammenfassung .....	69
4.4.2	Beurteilung des Zeitfensters für Fahrerinformationen .....	70
4.4.3	Einordnung der Studienergebnisse .....	70
4.4.4	Negative Effekte der Fahrerinformationen .....	71
4.4.5	Einschränkungen .....	71
4.4.6	Schlussfolgerungen .....	72
<b>5</b>	<b>Studie II: Spezifität von Fahrerinformationen</b> .....	<b>73</b>
<b>5.1</b>	<b>Fragestellung</b> .....	<b>73</b>
<b>5.2</b>	<b>Methodik</b> .....	<b>74</b>
5.2.1	Versuchsumgebung und Mensch-Maschine-Schnittstelle .....	74
5.2.2	Versuchsdesign .....	74
5.2.3	Häufigkeit der Informationsdarbietung .....	77
5.2.4	Abhängige Variablen .....	78
5.2.5	Stichprobe.....	79
5.2.6	Versuchsablauf .....	80
<b>5.3</b>	<b>Ergebnisse</b> .....	<b>80</b>
5.3.1	Vorgehen bei der Ergebnisdarstellung .....	80
5.3.2	Hauptfragestellung: Einfluss Spezifität.....	81
5.3.3	Nachbefragungsergebnisse.....	85
5.3.4	Zusätzliche Fragestellung: Einfluss Informationszeitpunkt .....	87
<b>5.4</b>	<b>Diskussion</b> .....	<b>93</b>
5.4.1	Beurteilung der Spezifität der Fahrerinformationen.....	94
5.4.2	Beurteilung des Effekts des Informationszeitpunkts.....	95
5.4.3	Negative Effekte der Fahrerinformationen .....	95
5.4.4	Einschränkungen der Studie .....	96
5.4.5	Schlussfolgerungen .....	97
<b>6</b>	<b>Studie III: Auswirkungen von Falsch- und Fehlinformationen</b> .....	<b>98</b>
<b>6.1</b>	<b>Fragestellung und Studienaufbau</b> .....	<b>98</b>
<b>6.2</b>	<b>Methodik</b> .....	<b>100</b>
6.2.1	Versuchsumgebung und Mensch-Maschine-Schnittstelle .....	100
6.2.2	Abhängige Variablen .....	100
6.2.3	Stichprobe.....	101

6.2.4	Versuchsablauf .....	101
<b>6.3</b>	<b>Studienteil A: Visuell vs. visuell-auditiv vs. Baseline.....</b>	<b>102</b>
6.3.1	Methodik .....	102
6.3.2	Ergebnisse.....	103
<b>6.4</b>	<b>Studienteil B: Falsche und unnötige Alarme.....</b>	<b>112</b>
6.4.1	Methodik .....	112
6.4.2	Ergebnisse.....	114
<b>6.5</b>	<b>Studienteil C: Fehlerhafte Richtungsanzeigen.....</b>	<b>123</b>
6.5.1	Methodik .....	123
6.5.2	Ergebnisse.....	126
<b>6.6</b>	<b>Diskussion.....</b>	<b>142</b>
6.6.1	Teil A: Assistenzbedingung .....	142
6.6.2	Teil B: Falsche und unnötige Informationen .....	143
6.6.3	Teil C: Fehlerhafte Richtungsanzeigen .....	144
6.6.4	Einschränkungen der Studie .....	146
6.6.5	Schlussfolgerungen .....	146
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>148</b>
<b>7.1</b>	<b>Gestaltungsempfehlungen .....</b>	<b>149</b>
7.1.1	Zeitpunkt der Informationsdarbietung.....	149
7.1.2	Spezifität .....	149
7.1.3	Dringlichkeit .....	150
<b>7.2</b>	<b>Ausblick.....</b>	<b>150</b>
7.2.1	Anwendungsmöglichkeiten .....	150
7.2.2	Forschungsbedarf.....	151
<b>8</b>	<b>Referenzen.....</b>	<b>153</b>
<b>8.1</b>	<b>Einbettung der Arbeit und Veröffentlichungen .....</b>	<b>153</b>
<b>8.2</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>154</b>
<b>9</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>165</b>

## Danksagung

Diese Arbeit entstand im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderten Verbundprojekts Ko-PER am Interdisziplinären Zentrum für Verkehrswissenschaften (IZVW) der Universität Würzburg.

Mein Dank geht an alle Kollegen des IZVW, insbesondere an Alexandra Neukum, Heidi Grattenthaler und Norbert Schneider für die wertvollen Diskussionen und die fachliche Unterstützung bei der Entstehung dieser Arbeit. Weiterhin gilt mein Dank den Kollegen der Arbeitsgruppe Mensch-Maschine-Interaktion innerhalb des Ko-PER Projekts für die spannenden Diskussionen und Anregungen. An dieser Stelle möchte ich insbesondere Reiner Wertheimer, Galia Weidl und Felix Schwarz danken. Mein besonderer Dank geht außerdem an alle wissenschaftlichen Hilfskräfte, die diese Arbeit teilweise von Beginn an begleitet und stets zuverlässig unterstützt haben: Daniel Schöttl, Jutta Zimmer, Lorenz Kolb und Nils Müller. Für die Unterstützung beim Probandenmanagement und die Betreuung des Fahrsimulators geht mein herzlicher Dank an Sonja Hoffman.

Mein besonderer Dank geht an Prof. Dr. Hans-Peter Krüger, der diese Arbeit möglich machte und in den ersten Jahren betreute. Besonders möchte ich Prof. Dr. Andrea Kiesel danken, die die Betreuung der Arbeit unverzüglich und mit großem Engagement übernommen hat. Vielen Dank für die vielen Ratschläge bei der Vollendung der Dissertation, die sehr wertvoll für mich waren und maßgeblich zum erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit beigetragen haben! Mein herzlicher Dank geht ebenso an Prof. Dr. Wilfried Kunde, der sich freundlicherweise für die Zweitbetreuung bereit erklärt hat.

Ich möchte außerdem meiner Familie danken, die mich immer unterstützt hat und immer für mich da war. Mein größter Dank geht an Katharina, für deine unersetzliche Unterstützung und Motivation, die außerordentlich wichtig und inspirierend für mich war.

# 1 Kurzfassung

Die meisten Unfälle mit Personenschaden in der Bundesrepublik Deutschland sind infolge urbaner Verkehrskonflikte zu verzeichnen. Die Mehrzahl dieser Unfälle findet in Kreuzungssituationen statt (sog. Kreuzen-, Einbiege- und Abbiege-Unfälle). Heutige Assistenzsysteme zur Kollisionsvermeidung oder -abschwächung stoßen in diesen Situationen aufgrund der durch bordeigene Fahrzeugsensorik eingeschränkten Möglichkeiten zur Erfassung der Verkehrsumgebung an ihre Grenzen. Diese Einschränkungen ergeben sich beispielsweise durch Sichtverdeckungen (z.B. durch parkende Fahrzeuge oder Häuserreihen, welche die Sicht in Kreuzungsarme verdecken) oder die begrenzte Erfassungsgüte verletzlicher Verkehrsteilnehmer (Fußgänger, Radfahrer oder Motorradfahrer). Zukünftige kooperative Kommunikationstechnologien, basierend auf Fahrzeug-Fahrzeug- und Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation, ermöglichen es, dem Fahrer<sup>1</sup> auch in komplexen urbanen Konfliktsituationen frühzeitig Informationen über potentielle Gefahrensituationen zu übermitteln. Gleichwohl liegen Konzepte zur Ausgestaltung einer solchen Fahrerunterstützung, die den Fähigkeiten und Bedürfnissen des Fahrers entsprechen, bislang nur vereinzelt vor.

In dieser Arbeit wird deshalb ein neuartiges Konzept zur frühzeitigen Fahrerunterstützung entwickelt und in einer im Fahrsimulator durchgeführten Studienreihe empirisch evaluiert. Ziel ist es, dem Fahrer im Gegensatz zu dringlichen Kollisionswarnungen, wie sie heutzutage beispielsweise im Kontext von Notbremsassistenten verwendet werden, frühzeitig auf drohende Verkehrskonflikte hinzuweisen. Um die Zuverlässigkeit dieser Unterstützung zu erhöhen, soll der Fahrer (1.) so früh wie nötig aber so spät wie möglich, (2.) so spezifisch wie nötig und (3.) so dringlich wie nötig informiert werden. Diese drei zentralen Gestaltungskriterien (Zeitpunkt, Spezifität und Dringlichkeit) wurden in meiner Arbeit in umfassenden Probandenstudien empirisch untersucht, wobei die zu erwartende Unzuverlässigkeit der maschinellen Situationsanalyse und -prädiktion expliziter Bestandteil des Studiendesigns war. Folgende Gestaltungsempfehlungen können, basierend auf den Studienergebnissen, gegeben werden:

- **Zeitpunkt:** Die Fahrerinformationen sollten eine bis zwei Sekunden vor dem letztmöglichen Warnzeitpunkt<sup>2</sup> ( $t_{0+1s/2s}$ ) präsentiert werden. Noch frühzeitigere Fahrerinformationen führten zu keiner weiteren Wirksamkeitssteigerung. Fahrerinformationen zum letztmöglichen Warnzeitpunkt ( $t_0$ ) hatten keinen positiven Einfluss auf das Fahrverhalten.
- **Spezifität:** Die Fahrerinformationen sollten eine Anzeige der Richtung, aus welcher der Konflikt droht (sog. richtungsspezifische Anzeige), beinhalten. Unspezifische Anzeigen (bloße Anzeige, dass ein Konflikt droht) führten zwar zu vergleichbaren Verhaltenseffekten wie spezifische Anzeigen. Die Anzeige der Konfliktrichtung steigerte jedoch die wahrgenommene Nützlichkeit der Fahrerunterstützung. Falls mit der Ausgabe fehlerhafter Richtungsanzeigen zu rechnen ist, wird dennoch eine unspezifische Anzeigestrategie empfohlen, da fehlerhafte Richtungsanzeigen eine Einschränkung der subjektiven Nützlichkeit zur Folge hatten. Auch die Anzeige der Art des Konfliktpartners führte zu einer höheren subjektiven Nützlichkeit, jedoch berichteten die Fahrer gleichzeitig von einer erhöhten Ablenkungswirkung dieser Anzeigen.
- **Dringlichkeit:** Es sollte ein rein visuelles Anzeigekonzept verwendet werden. Zwar führten dringlichere, visuell-auditive Anzeigen zu einer schnelleren Bremsreaktion als rein visuelle Anzeigen. In Anbetracht der Frühzeitigkeit der Fahrerinformationen war

---

<sup>1</sup> Um der besseren Lesbarkeit willen wird im Text darauf verzichtet, durchgängig die männliche und weibliche Form nebeneinander zu verwenden. Steht die männliche Form allein, sind immer auch Frauen angesprochen.

<sup>2</sup> Als letztmöglicher Warnzeitpunkt ( $t_0$ ) wird in dieser Arbeit der Zeitpunkt bezeichnet, bei dem noch eine Sekunde zur Verfügung steht, bis der Fahrer spätestens einen starken Bremsengriff durchführen muss, um die drohende Kollision vermeiden zu können.

dies zum einen jedoch nicht entscheidend für deren Wirksamkeit. Zum anderen wirkten sich falsche Alarme gerade bei visuell-auditiven Fahrerinformationen negativ auf Bremsreaktion und Wirksamkeit aus.

## 2 Hintergrund und Motivation der Arbeit

### 2.1 Fahrerunterstützung durch kooperative Umfelderkennung

Innerstädtische Verkehrssituationen stellen in der Bundesrepublik Deutschland einen Unfallschwerpunkt dar. 69% der Unfälle mit Personenschaden ereigneten sich 2012 im innerstädtischen Bereich (Statistisches Bundesamt, 2013), wobei ca. 42% dieser Unfälle allein auf sogenannte Einbiege-, Kreuzen- und Abbiege-Unfälle entfielen (siehe Abbildung 1).

#### Unfälle mit Personenschaden in 2012

##### Innerorts

Quelle: Statistisches Bundesamt

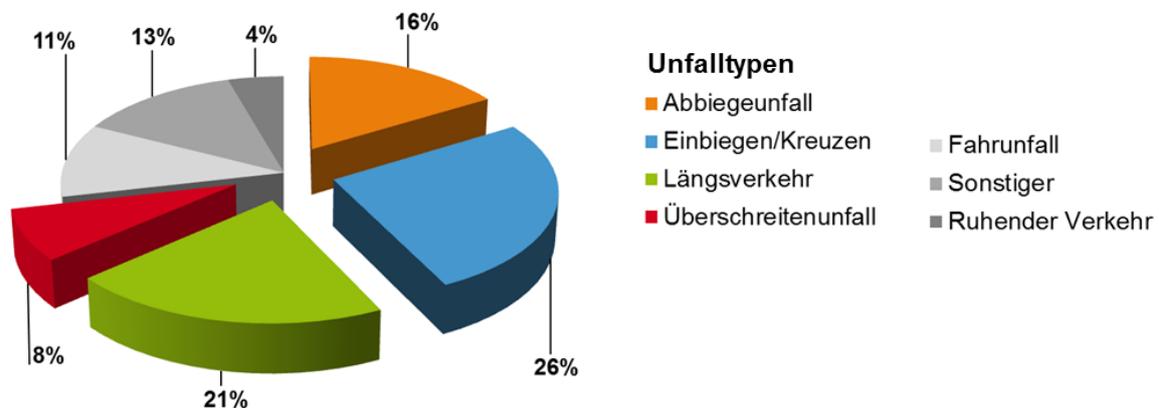


Abbildung 1: Unfälle mit Personenschaden 2012 (Statistisches Bundesamt, 2013). Abbiegeunfall: Konflikt zwischen Abbieger und aus gleicher/entgegengesetzter Richtung kommendem Verkehrsteilnehmer; Einbiegen/Kreuzen: Konflikt zwischen einbiegendem/kreuzendem Wartepflichtigen und vorfahrberechtigtem Fahrzeug; Längsverkehr: Konflikt zwischen Verkehrsteilnehmern, die sich in gleicher/entgegengesetzter Richtung bewegen; Überschreiten: Konflikt zwischen Fahrzeug und Fußgänger auf der Fahrbahn; Fahrnunfall: Verlust der Fahrzeugkontrolle; Ruhender Verkehr: Konflikt zwischen Fahrzeug des fließenden Verkehrs und parkendem Fahrzeug. Unfalltypen, die zu den Anwendungsfällen dieser Arbeit zählen, sind farblich hervorgehoben.

Die Bewältigung von komplexen innerstädtischen Verkehrssituationen stellt hohe Anforderungen an den Fahrer, wodurch die Vielzahl der Unfälle teilweise erklärt werden kann. In der Annäherung an die Verkehrssituation (bspw. zum Abbiegen oder Durchfahren einer Kreuzung) müssen mehrere Verkehrsobjekte parallel überwacht (z.B. Umgebungsverkehr, Fußgänger am Straßenrand, Verkehrsschilder und Lichtsignalanlagen) und zueinander in Beziehung gesetzt werden. Um eine drohende Kollision im Falle eines Verkehrskonflikts abzuwenden, ist innerhalb eines begrenzten Zeitfensters eine Entscheidung zu einem Eingriff in die Fahrzeugführung erforderlich. Es kann fatale Folgen haben, wenn relevante Verkehrsteilnehmer, beispielsweise aufgrund von fehlender Blickzuwendung zu einem Kreuzungsarm oder Sichtverdeckung, übersehen werden, oder das Kollisionsrisiko mit diesen falsch eingeschätzt wird. Frühzeitige Hinweise auf relevante Verkehrsteilnehmer könnten den Fahrer in diesen Verkehrssituationen bei der Vermeidung potentieller Konflikte entscheidend unterstützen.

Durch technische Fortschritte im Bereich der maschinellen Erfassung der Verkehrsumgebung (bspw. durch Radarsensoren oder Kameras) sind aktive Sicherheitssysteme zur Fahrerunterstützung schon heutzutage in der Lage, Unfälle zu vermeiden oder abzuschwächen (bspw. Frontalkollisionswarnungen oder Notbremsassistenten). Diese bereits marktüblichen Assistenzsysteme warnen den Fahrer vor drohenden Konfliktsituation und greifen, wenn nötig, selbstständig durch Teil- oder Notbremsungen in die Fahrzeugführung ein. Durch die Verwendung bordeigener Sensorik ist

eine vollständige Erfassung der Verkehrssituation, wie sie für eine optimale Fahrerunterstützung in komplexen Verkehrssituationen im innerstädtischen Bereich notwendig ist, momentan nicht gegeben (Seeliger et al., 2014).

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderten Verbundprojekts Ko-PER (*Kooperative Perzeption*) durchgeführt, welches Verbesserungen der aktiven Sicherheit im Straßenverkehr zum Ziel hatte. Über drahtlose Fahrzeug-Fahrzeug- und Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation (sog. *C2X-Kommunikation*) werden Informationen über das Verkehrsgeschehen gewonnen und mit der fahrzeuglokalen Umfeld-Erfassung fusioniert (sog. kooperative Umfelderkennung). Verglichen mit ausschließlich fahrzeuglokaler Sensorik, wie sie in heutigen Assistenzsystemen gängig ist, können potentielle Verkehrskonflikte vollständiger und früher erkannt werden.

Aus Fahrersicht ermöglicht dies zum einen die Auflösung von verdeckten Verkehrssituationen (sog. Verdeckungssituationen), zum anderen eine frühzeitigere Fahrerunterstützung, wodurch sich der Einsatzbereich von Fahrerassistenz erheblich erweitert. Abbildung 2 stellt ein Beispiel für eine Konfliktsituation dar, in der erst durch kooperative Sensorik eine effektive Fahrerunterstützung möglich wird. In der Anfahrt zum Rechtsabbiegen an einer Kreuzung ist ein Fußgänger, der die Straße queren möchte, für den Fahrer verdeckt. Falls der Fahrer den Fußgänger aufgrund der Sichtverdeckung zu spät bemerkt und seine Fahrgeschwindigkeit nicht entsprechend reduziert, kann es zur Gefährdung des Fußgängers kommen.



Abbildung 2: Anwendungsbeispiel für Unterstützungsmöglichkeiten durch kooperative Umfelderkennung. In der Anfahrt an eine Kreuzung ist ein Fußgänger durch Objekte am Straßenrand sowohl aus Sicht des Fahrers (welcher rechts abbiegen möchte, siehe linker Teil der Abbildung) als auch für auf fahrzeuglokaler Sensorik basierende Assistenzsysteme verdeckt. Durch kooperative Umfelderkennung ist eine Fahrerunterstützung auch in solchen Konfliktsituationen möglich.

Aus demselben Grund ist eine Fahrerunterstützung, die auf fahrzeuglokaler Sensorik basiert, wenn überhaupt, nur zu einem sehr späten Zeitpunkt möglich (d.h. sobald der Fußgänger sichtbar wird). Dagegen ermöglicht es kooperative Umfelderkennung auch in Verdeckungssituationen, potentielle Verkehrskonflikte zu identifizieren und den Fahrer frühzeitig bei deren Vermeidung zu unterstützen. Konzepte für diese neuartige Fahrerassistenz wurden bisher jedoch nur in wenigen Forschungsarbeiten behandelt (z.B. Lenné & Triggs, 2008; Seeliger et al., 2014; Werneke & Vollrath, 2013; Zarife, 2014, siehe Kapitel 3 für eine ausführliche Darstellung vorhandener Studien). Gleichwohl stellt die Berücksichtigung der Bedürfnisse und Fähigkeiten von Fahrern aus verschiedenen Gründen eine entscheidende Voraussetzung für die Wirksamkeit dieser neuartigen Fahrerunterstützung dar.

Erstens zielt der in meiner Arbeit verfolgte Ansatz zur Fahrerunterstützung im Gegensatz zu heutigen Unterstützungskonzepten auf eine **frühzeitige Lenkung der Aufmerksamkeit** auf potentielle Verkehrskonflikte ab. Erfolgt die Unterstützung jedoch zu frühzeitig, wird sie möglicherweise als ungerechtfertigt oder unnötig empfunden (Bogenberger, Dinkel, Totzke, Naujoks & Mühlbacher, 2012; Brown, Lee & McGehee, 2001; Werneke, Kleen & Vollrath,

2013). Hieraus könnte eine Akzeptanzminderung resultieren, wodurch positive Effekte auf die Fahrsicherheit trotz des großen Potentials kooperativer Umfelderkennung ausbleiben würden (siehe bspw. Bogenberger et al., 2012).

Zweitens ermöglicht kooperative Umfelderkennung verglichen mit heutigen Assistenzsystemen eine Fahrerunterstützung in einer weitaus größeren Breite an Verkehrssituationen, was möglicherweise eine **komplexere Anzeigestrategie** erfordert (z.B. Anzeige der Art des Konfliktpartners oder der Konfliktrichtung, siehe beispielsweise Thoma, Lindberg & Klinker, 2009; Zarife, 2014). Andererseits könnten zu komplexe Anzeigen auch zu einer Wirksamkeitsminderung der Fahrerunterstützung führen, falls der kognitive Interpretationsaufwand der Anzeigen zu groß ist (Wickens & Carswell, 1995), und diese den Fahrer im schlimmsten Fall sogar von der Verkehrssituation ablenken (Wege, Will & Victor, 2013).

Drittens besteht ein wesentlicher Vorteil kooperativer Umfelderkennung darin, dass eine Fahrerunterstützung möglich ist, obwohl zwischen den beteiligten Verkehrsteilnehmern **kein Sichtkontakt** besteht (Seeliger et al., 2014). Da die Information jedoch vor allem aufgrund ihrer Frühzeitigkeit fehlerhaft sein kann, fehlt somit aus Fahrersicht eine unmittelbare Möglichkeit zur Verifikation, ob tatsächlich eine Konfliktsituation vorliegt (Brown et al., 2001; Lee, McGehee, Brown & Reyes, 2002; Seeliger et al., 2014; Weidl & Breuel, 2012; Weidl et al., 2014). Ob sich in Verdeckungssituationen ein objektiver oder subjektiver Nutzen der Fahrerunterstützung findet, kann aufgrund der bislang vorliegenden Untersuchungen nicht umfassend beantwortet werden. Die Konzeption sowie die empirische Evaluation einer auf kooperativen Umfeldsensorik basierenden frühzeitigen Fahrerunterstützung ist deshalb Inhalt dieser Arbeit.

## 2.2 Forschungsgegenstand: Frühzeitige Fahrerinformationen

Betrachtet man auf fahrzeuglokaler Sensorik basierende Konzepte zur Fahrerunterstützung in drohenden Konfliktsituationen, wird meist versucht, Kollisionen durch die Darbietung einer Fahrerwarnung, meist kombiniert mit einem autonomen Bremseneingriff, zu verhindern oder zu entschärfen (z.B. Lee et al., 2002; Abe & Richardson, 2004; 2005; 2006; Rhede, Wäller & Oel, 2011; Winner, 2009). Kennzeichen dieser **dringlichen Fahrerwarnungen** (sog. „*imminent crash warnings*“, Lenné & Triggs, 2009, siehe Abbildung 3) sind:

- Das Ziel, den Fahrer zu einer unmittelbaren Reaktion (Bremsen und/oder Ausweichen) auf das Warnsignal zu bringen
- Bevorzugte Verwendung dringlicher Warnsignale (z.B. visuell-auditiv oder visuell-haptisch, siehe bspw. SAE J 2400; ISO 15623:2013 (E))
- Übermittlung der Warnung an den Fahrer (siehe bspw. SAE J 2400; ISO 15623:2013 (E)) so spät wie möglich, jedoch so früh wie nötig, damit dieser den Konflikt mittels einer Bremsreaktion oder durch Ausweichen noch vermeiden kann

Durch kooperative Umfelderkennung ist es technisch möglich, die lokale Verkehrssituation umfassender und vollständiger zu erfassen, was eine frühzeitigere Unterstützung ermöglicht. Potentielle Konfliktsituationen könnten schon in ihrer Entstehung erkannt und an den Fahrer kommuniziert werden. Innerhalb der empirischen Untersuchungen dieser Arbeit wird der zeitliche Aufbau herkömmlicher, auf fahrzeuglokaler Umfelderkennung basierender Unterstützungskonzepte durch kooperative Sensorik um eine **frühzeitige Informationskomponente** (sog. Fahrerinformationen, engl. „*advisory warnings*“, Lenné & Triggs, 2009) erweitert, ohne den zeitlichen Aufbau etablierter Warnkonzepte zu modifizieren<sup>3</sup> (siehe Abbildung 3).

<sup>3</sup> d.h. diese neuartigen Fahrerinformationen sollen dringliche Warnungen nicht ersetzen, sondern ergänzen.

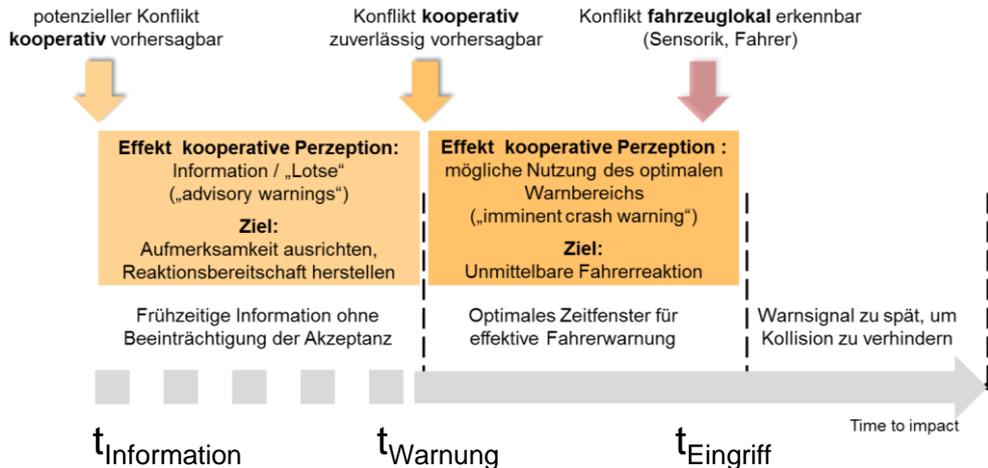


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Zeitfenster zur Fahrerunterstützung in den letzten Sekunden vor einer Kollision (Neukum, 2011) und mögliche Erweiterung durch kooperative Perzeption. Die Zeitschiene unter der Graphik stellt mögliche Zeitpunkte für verschiedene Arten der Fahrerunterstützung dar ( $t_{\text{Eingriff}}$ : Zeitfenster zu klein, als dass Fahrer den Konflikt selbst entschärfen kann;  $t_{\text{Warnung}}$ : optimaler Zeitpunkt zur Entschärfung der Situation durch einen Fahrereingriff nach einer dringlichen Fahrerwarnung;  $t_{\text{Information}}$ : optimaler Zeitpunkt zur Vermeidung des Konflikts durch eine frühzeitige Fahrerinformation).

Ziel der Arbeit ist es, zu untersuchen, wie Fahrer mittels frühzeitiger Fahrerinformationen bei der Vermeidung drohender Verkehrskonflikte bestmöglich unterstützt werden können. Diese neuartigen Signale zur Fahrerunterstützung werden in der vorliegenden Arbeit mit den folgenden Zielen konzeptualisiert:

- Frühzeitige Informationsübermittlung an den Fahrer (d.h. vor dem letztmöglichen Warnzeitpunkt)
- Ausrichtung der Aufmerksamkeit des Fahrers auf potentielle Verkehrskonflikte sowie Herstellung von Reaktionsbereitschaft (im Gegensatz zur unmittelbaren Einleitung einer Fahrerreaktion bei dringlichen Warnungen)
- Gestaltung der Fahrerinformation nur so dringlich wie nötig, damit das Informationssignal bemerkt wird und eine Aufmerksamkeitsausrichtung erfolgen kann (bspw. über rein visuelle Fahrerinformationen)

Zur Bewertung der Auswirkungen frühzeitiger Fahrerinformationen werden zum einen objektive Kriterien, wie Bremsreaktionen und resultierende Kritikalität von Verkehrssituationen sowie subjektive Einschätzungen von Probanden herangezogen.

## 2.3 Problemanalyse: Möglichkeiten frühzeitiger Fahrerunterstützung

Während des Fahrens ist vom Fahrer fortlaufend eine Stabilisierung des Fahrzeugs (Einhaltung von Geschwindigkeit und Spurposition) auf der gewählten Fahrtroute zu leisten (Donges, 1982). Dabei überwachen Fahrer die Verkehrsumgebung und das Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer kontinuierlich auf Veränderungen, um ihr eigenes Verhalten an sich verändernde Verkehrskonstellationen anzupassen und Kollisionen zu vermeiden (Koornstra, 1993; Brown, Lee & McGehee, 2000; Van der Hulst, Meijman & Rothengatter, 1999). Hierbei muss der Fahrer verschiedene Teilaufgaben bewältigen (siehe bspw. Winner, 2009), die mögliche Ansatzpunkte für eine Fahrerunterstützung darstellen. Zunächst muss die potentiell kritische Situation vom Fahrer wahrgenommen werden, was eine Aufmerksamkeitsausrichtung auf einen bestimmten Ort und ein bestimmtes Objekt in der Verkehrsumgebung erfordert (*Informationsaufnahme*, Winner, 2009). Durch wiederkehrende

Blickzuwendungen auf fahrtrelevante Orte der Verkehrsumgebung wird die Unsicherheit, ob sich ein anderes Verkehrsobjekt auf Kollisionskurs befindet, fortlaufend minimiert (Courage, Milgram & Smiley, 2000; Senders, Kristofferson, Levison, Dietrich & Ward, 1967). Dabei passen erfahrene Autofahrer ihre Suchstrategien an die Anforderungen der Fahraufgabe an (Chapman, Underwood & Roberts, 2002; Underwood, Chapman, Bowden & Crundall, 2002) und erwerben Gewohnheiten bezüglich situationsadaptiver Suchstrategien (Wickens & McCarley, 2007). Anschließend muss das Kollisionsrisiko bewertet und eine Entscheidung zur Einleitung einer Brems- bzw. Ausweichreaktion getroffen werden (*Informationsverarbeitung und Reaktionsselektion*, Winner, 2009).

Die Ursache, dass Fahrer die Notwendigkeit einer Bremsreaktion beim Fahren zu spät bemerken, sieht Rumar (1990) in zwei hauptsächlichen Fehlern begründet. Der erste Fehler („*cognitive error*“) beschreibt die fehlende Antizipation eines Verkehrskonflikts. Einerseits werden bestimmte Orte der Verkehrsumgebung möglicherweise nicht ausreichend überwacht, da an diesen kein potentieller Konfliktpartner erwartet wird („*failed to look*“-Unfall, Räsänen & Summala, 1998; siehe auch Theeuwes & Hagenzieker, 1993; Muhrer & Vollrath, 2010; Schweitzer, Apter, Ben-David, Liebermann & Parush, 1995). Alternativ wird nach dem falschen Verkehrsteilnehmer am „richtigen Ort“ gesucht („*looked but failed to see*“-Unfall, Rumar, 1990). In beiden Fällen liegen relevante Informationen für die Entscheidung über die Notwendigkeit einer Fahrerreaktion aus Fahrersicht nicht oder zu spät vor (Mourant & Rockwell, 1972; Pradhan et al., 2005). In überraschenden Situationen zeigen Fahrerwarnungen folglich die größte Wirksamkeit (Schmidt & Krüger, 2010).

Eine weitere Fehlerart besteht nach Rumar (1990) darin, dass relevante Verkehrsobjekte unter bestimmten situativen Umständen schlecht wahrnehmbar sind („*perceptual error*“). Wenn die Sichtbarkeit relevanter Verkehrsobjekte eingeschränkt ist, beispielsweise aufgrund schlechter Sichtverhältnisse (wie Dunkelheit oder Nebel), sind diese eventuell nicht ausreichend salient und werden folglich nicht oder zu spät bemerkt. Dies könnte ebenso der Fall sein, wenn sich die Objekte in der Peripherie des visuellen Sichtfelds befinden, oder wenn die Sicht auf potentielle Konfliktpartner beispielsweise durch Straßenbebauung oder parkende Fahrzeuge verdeckt ist.

Das sogenannte SEEV-Modell der Aufmerksamkeit (*Saliency-Effort-Expectancy-Value*, Wickens & McCarley, 2007) kann zur Erklärung der von Rumar (1990) beschriebenen Fehlerarten herangezogen werden (siehe beispielsweise Horrey, Wickens & Consalus, 2006; Neukum, Naujoks, Kappes & Wey, 2014; Werneke & Vollrath, 2012). Fahrerseitige Erwartungen („*Top-down*“-Verarbeitung) und Eigenschaften fahrtrelevanter Verkehrsobjekte („*Bottom-up*“-Verarbeitung) bestimmen in diesem Modell die Häufigkeit und Länge der Blickzuwendungen zu bestimmten Orten oder Verkehrsteilnehmern in der Fahrumgebung (z.B. Blicke in Kreuzungsarme, Werneke & Vollrath, 2013; Aufmerksamkeitsverteilung zwischen Windschutzscheibe und einer Nebenaufgabe, Horrey et al., 2006).

*Top-down* Steuerung der Aufmerksamkeit besteht im SEEV-Modell (Wickens & McCarley, 2007) darin, dass Fahrer Informationen mit hoher Relevanz für die sichere Fahrzeugführung (*Value*), und bestimmten Teilen der Verkehrssituation, an welchen sie das Auftreten von Konfliktpartnern erwarten (*Expectancy*), bevorzugt ihre willkürliche Aufmerksamkeit zuwenden. Die Erwartung wird zum einen durch die Häufigkeit (*Bandwidth*), mit welcher relevante Ereignisse am jeweiligen Ort vorkommen (bspw. die Straße querende Fußgänger an Fußgängerüberwegen), bestimmt. Weiterhin spielen Kontextinformationen, welche die Anwesenheit relevanter Verkehrsteilnehmer zu einem bestimmten Zeitpunkt wahrscheinlich machen, eine Rolle. So ist es beispielsweise wahrscheinlicher, dass Schulkinder die Straße an einer Schule zu bestimmten Uhrzeiten (Schulbeginn/-ende oder Pausenzeiten) queren, was wiederum eine Aufmerksamkeitszuwendung wahrscheinlicher macht.

Im Hinblick auf *Bottom-up* Steuerung der Fahreraufmerksamkeit wird davon ausgegangen (Wickens & McCarley, 2007), dass bestimmte physische Reizeigenschaften die Aufmerksamkeitszuwendung im Sinne eines „*pop-out*“-Effekts (*Saliency*) wahrscheinlicher machen. Beispiel hierfür ist der Einsatz von Blaulicht bei Krankenwagen oder

Polizeifahrzeugen. Wenn die Aufmerksamkeitszuwendung allerdings mit subjektiven Kosten verbunden ist, wird mit geringerer Wahrscheinlichkeit nach Konfliktpartnern gesucht (*Effort*; bspw. beim Lesen einer Textnachricht auf einem Mobiltelefon).

Sofern der Fahrer seine Aufmerksamkeit auf einen Ort in der Verkehrsumgebung ausrichtet und einen potentiellen Konfliktpartner erkennt, muss eine Entscheidung bezüglich der Notwendigkeit eines Brems- oder Lenkeingriffs getroffen werden, um die Situation zu entschärfen. Eine Fehleinschätzung der verbleibenden Zeit zur Kollision, die auf Basis des *optischen Flusses*<sup>4</sup> abgeschätzt wird (E. R. Hoffmann & Mortimer, 1994; Lee, 1976; McLeod & Ross, 1983; Schiff & Detwiler, 1979), und ein damit einhergehender verspäteter Bremsingriff, können ebenfalls zu kritischen Situationen oder Unfällen führen.

Für die Gestaltung effektiver frühzeitiger Fahrerinformationen ist es, ausgehend von den angeführten Überlegungen, von großer Bedeutung, die Unterstützung in drohenden Konfliktsituationen an die spezifischen Bedürfnisse des Fahrers anzupassen. Die Unterstützung soll es dem Fahrer ermöglichen, (1.) ein kritisches Objekt, welches sich an einem bestimmten Ort in der Verkehrsumgebung befindet, rechtzeitig vor einer möglichen Kollision zu bemerken (*Informationsaufnahme*), (2.) die Wahrscheinlichkeit einer Kollision richtig einzuschätzen (*Informationsverarbeitung*) und (3.) angemessen in Form eines Brems- oder Lenkeingriffs zu reagieren (*Reaktionsselektion* und *Ausführung*). Durch kooperative Umfelderkennung entsteht erstmals die Möglichkeit, den Fahrer umfassend und frühzeitig bei diesen Fahraufgaben zu unterstützen. Im Hinblick auf die Gestaltung einer frühzeitigen Fahrerunterstützung stellen sich mehrere zentrale Fragen, die Bestandteil der vorliegenden Arbeit sind:

1. Zu welchem **Zeitpunkt** müssen frühzeitige Informationssignale an den Fahrer übermittelt werden, damit dieser genügend Zeit hat, seine Aufmerksamkeit auf potentielle Verkehrskonflikte auszurichten und Reaktionsbereitschaft herzustellen?
2. Wie **spezifisch** sollten Fahrer informiert werden, damit sie die dargebotenen Anzeigen im Kontext der jeweiligen Verkehrssituation richtig interpretieren und eine adäquate Reaktion einleiten können? Es ist denkbar, dass frühzeitige Informationen nur dann einen positiven Effekt auf das Fahrverhalten in kritischen Situationen haben, wenn sie möglichst spezifisch gestaltet sind (z.B. Informationen über Richtung und Art des Konfliktpartners). Andererseits ist es möglich, dass spezifische Signale in Anbetracht des nur knappen zur Verfügung stehenden Zeitrahmens eine Ablenkungsquelle darstellen wenn sie den Fahrer aufgrund ihrer Komplexität zu stark beanspruchen.
3. Wie **dringlich** sind Fahrer über die Konfliktsituationen zu informieren? Angesprochen ist an dieser Stelle die Frage nach der Modalität der Fahrerinformationen. Während sich im Hinblick auf dringliche Warnungen visuell-auditive oder visuell-haptische Signale aufgrund geringerer Reaktionszeiten gegenüber unimodalen Anzeigen etabliert haben (siehe bspw. SAE J 2400; ISO 15623:2013 (E)), ist es fraglich, ob frühzeitige Informationen ähnlich dringlich gestaltet werden müssen.

## 2.4 Grenzen kooperativer Umfelderkennung

In Studien zur Warngestaltung steht meist die Maximierung der Verhaltenswirksamkeit durch Minimierung der Reaktionszeit im Vordergrund (z.B. Fricke, 2009; Totzke, Naujoks, Mühlbacher & Krüger, 2012; Werneke & Vollrath, 2013; Yan, Xue, Ma & Xu, 2014; Zarife, 2014; Zhang, Yan & Yang, 2014). Um dies zu erreichen, werden oftmals komplexe Anzeigestrategien und teilweise sehr frühe Warnzeitpunkte gewählt (siehe Kapitel 3.2.2). Die

---

<sup>4</sup> Unter optischem Fluss versteht man das Muster, das Bewegungen auf der Retina des Auges erzeugen (Britten, 2008; Gibson, 1982). Daraus lässt sich die Wahrscheinlichkeit für Kollisionen mit anderen Objekten der Verkehrsumgebung ableiten. Der Kollisionszeitpunkt (sog. Time-to-collision, TTC) berechnet sich aus dem Quotient des Öffnungswinkels zweier Objektpunkte auf dem retinalen Abbild und der Änderungsgeschwindigkeit dieser Punkte.

Herausforderung bei der Gestaltung frühzeitiger Fahrerinformationen liegt jedoch insbesondere in der Entscheidung über die Weitergabe einer Information an den Fahrer, die zwar technisch erfassbar, möglicherweise aber unzuverlässig oder unnötig ist.

Grundlage für die Ausgabe einer Fahrerwarnung oder -information ist die sogenannte Situationsanalyse (Weidl & Breuel, 2012; Weidl et al., 2014). Durch kooperative Umfelderkennung werden zunächst die relevanten Teilnehmer einer Verkehrssituation erfasst. Anschließend wird eine probabilistische Zuordnung der Verkehrsteilnehmer zu möglichen Fahrstreifen sowie eine Schätzung der wahrscheinlichen Bewegungsrichtungen vorgenommen. Durch paarweise Vergleiche werden die geschätzten Bewegungspfade auf Überlappungen überprüft und das Kollisionsrisiko ermittelt (bspw. über die noch verbleibende Zeit bis zur Kollision, falls die Konfliktpartner ihre Bewegungsrichtungen beibehalten). Das prädierte Kollisionsrisiko stellt die Grundlage für die Auslösung einer Fahrerunterstützung dar. Mehrere Unsicherheitsquellen sind bei der Erfassung und Kommunikation von potentiellen Verkehrskonflikten denkbar. So kann die Erkennung der Art des Kollisionspartners (z.B. PKW, Fußgänger oder Radfahrer, sog. **Kategorienunsicherheit**), die Erfassung und Prädiktion des Ortes des betreffenden Konfliktpartners (sog. **räumliche Unsicherheit**) sowie die Erfassung des gemeinsamen Konfliktpunkts und der verbleibenden Zeit bis zur Kollision (sog. **zeitliche Unsicherheit**) mit Unsicherheit behaftet sein.

In dieser Arbeit sollen deshalb auch die Grenzen der kooperativen Umfelderkennung bei der Gestaltung der Fahrerunterstützung berücksichtigt werden. Eine fehlerhafte Informationsdarbietung könnte beispielsweise von dem betreffenden Verkehrskonflikt ablenken bzw. mit der bereits begonnenen Reaktionsausführung interferieren (siehe bspw. Wege et al., 2013). Dies kann sich negativ auf die Effektivität und Akzeptanz der Fahrerunterstützung auswirken (siehe Bliss & Acton, 2003; Lees & Lee, 2007; Weidl & Breuel, 2012; Weidl et al., 2014; Yamada & Kuchar, 2006). Die Kenntnis der Grenzen von kooperativer Umfelderkennung ermöglicht Optimierungsansätze für die Gestaltung der Fahrerunterstützung, welche in meinen empirischen Arbeiten berücksichtigt werden sollen. Einerseits könnten die Anforderungen an die (maschinelle) Situationsanalyse durch eine entsprechende Ausgestaltung der Fahrerunterstützung minimiert werden. Je **unspezifischer und später** der Fahrer informiert wird, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit für fehlerhafte Informationsdarbietungen. In ähnlicher Weise könnten die zu erwartenden negativen Folgen der Unsicherheit der Situationsprädiktion auf das Fahrverhalten und die Akzeptanz abgeschwächt werden. Je **unaufdringlicher** die Fahrerunterstützung gestaltet ist, desto geringer werden negative Effekte auf das Fahrverhalten und die Akzeptanz im Fehlerfall (d.h. falls die Ausgabe unnötig oder fehlerhaft ist) möglicherweise ausfallen (J. Hoffmann & Gayko, 2012).

## 2.5 Zusammenfassung

Durch die Entwicklung von Kommunikationsmöglichkeiten zwischen Verkehrsteilnehmern untereinander und mit infrastruktureller Sensorik bieten sich neue Ansätze zur Fahrerunterstützung bei drohenden Verkehrskonflikten. Während Fahrer von heutigen Assistenzsystemen erst dann gewarnt werden, wenn eine drohende Kollision unmittelbar bevorsteht, werden zukünftige kooperative Assistenzsysteme in der Lage sein, potentielle Konfliktsituationen bereits frühzeitig in ihrer Entstehung zu erkennen und eine Fahrerunterstützung bereitzustellen. Dies stellt in mehrfacher Hinsicht neue Herausforderungen aus Sicht der Mensch-Maschine-Interaktion dar, welche bisher weitgehend unerforscht sind.

Bisherige Assistenzsysteme erfordern vom Fahrer eine unmittelbare Reaktion auf dringliche Fahrerwarnungen in Form eines Brems- und/oder Lenkeingriffs, wohingegen frühzeitige Fahrerinformationen die Aufmerksamkeitslenkung und die Herstellung der Reaktionsbereitschaft des Fahrers zum Ziel haben. Konzepte zur Gestaltung einer solchen Fahrerunterstützung liegen bislang nur vereinzelt vor. Die Frühzeitigkeit der konzipierten Fahrerunterstützung stellt hohe Anforderungen an die maschinelle Situationsanalyse. Um

fehlerhafte Ausgaben an den Fahrer zu vermeiden, ist deren Komplexität einzuschränken, ohne dabei die Wirksamkeit zu mindern.

Innerhalb der vorliegenden Arbeit werden umfassende Studien zur Gestaltung der Fahrerunterstützung für frühzeitige Fahrerinformationen durchgeführt und berichtet. Es werden Gestaltungsempfehlungen erarbeitet, um den Fahrer in Konfliktsituationen optimal zu unterstützen und gleichzeitig die Prädiktionsunsicherheit kooperativer Sensorik gering zu halten (z.B. Mindestanforderung an Zeitpunkt und Spezifität der an den Fahrer übermittelten Information). Weiterhin werden umfassende Studien zur Abschätzung der Auswirkungen möglicher Grenzen der Prädiktion und Übermittlung kritischer Verkehrssituationen auf das Fahrverhalten und die Akzeptanz der Fahrerunterstützung durchgeführt und berichtet.

## 3 Theoretischer Hintergrund

Zielsetzung dieses Kapitels ist es, eine Übersicht über Literaturbefunde zu geben, die für die Gestaltung der Fahrerunterstützung durch frühzeitige Fahrerinformationen relevant sind, um daraus eine prototypische Gestaltung abzuleiten. Zu Beginn muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass zur Gestaltung dieser frühzeitigen prädiktiven Form der Fahrerunterstützung bisher nur wenige Forschungsarbeiten vorliegen, was möglicherweise an der (aus technischer Sicht) Neuartigkeit dieser Thematik liegt. Aus diesem Grund wird teilweise auf Arbeiten zu dringlichen Fahrerwarnungen zurückgegriffen, auch wenn eine Übertragbarkeit der Erkenntnisse aufgrund des kleineren zur Verfügung stehenden Zeitfensters nicht unbedingt gegeben ist.

In der Literaturübersicht wird zunächst auf die Frage geeigneter **Zeitfenster** für effektive Fahrerinformationen eingegangen (Kapitel 3.1). Anschließend werden Untersuchungen, die sich mit dem Aspekt des **Informationsinhalts** beschäftigen, zusammenfassend vorgestellt (Kapitel 3.2). Dabei wird der Frage nachgegangen, inwieweit Fahrer von einer umfangreicheren Information als der bloßen Anzeige, dass ein Verkehrskonflikt vorliegt, profitieren. Insbesondere wird die Präsentation der Art (sog. *Konfliktspezifität*) und Richtung des drohenden Konflikts (sog. *Richtungsspezifität*) sowie deren Integration im Anzeigekonzept diskutiert. Weitere Aspekte wie die Anzeige der verbleibenden Entfernung zum Konfliktpartner (sog. *Abstandsspezifität*) oder die bestehende Unsicherheit der Informationen (sog. *Risikospezifität*) werden der Vollständigkeit halber angeführt, auch wenn diese im empirischen Teil der Arbeit nicht behandelt werden.

Weiterhin werden Gestaltungsempfehlungen und Untersuchungen zur **Informationsmodalität** aufgeführt (Kapitel 3.3). Behandelt wird dabei die Frage, in welcher Form Informationen an den Fahrer weitergegeben werden sollen (visuell, auditiv oder haptisch bzw. kombiniert). Abschließend werden Untersuchungen zu Auswirkungen von **Systemgrenzen** der Fahrerunterstützung beschrieben und zusammengefasst (Kapitel 3.4). In Bezug auf Fahrerwarnungen wurden bisher vor allem sogenannte falsche Alarme (Warnung, obwohl keine kritische Situation vorliegt) und verpasste Alarme (keine Warnung, obwohl kritische Situation vorliegt) untersucht. Vor dem Hintergrund der gesteigerten Komplexität der Anzeigekonzepte von Warnsystemen wird eine Erweiterung der Einteilung in falsche und verpasste Alarme in Teilkapitel 3.4 vorgeschlagen.

### 3.1 Zeitfenster für effektive Fahrerinformationen

#### 3.1.1 Grundlagenorientierte Arbeiten

Grundsätzlich kann die Darbietung von Fahrerinformationen als ein Hinweisreiz (sog. *Cue*) begriffen werden, der die Reaktion des Fahrers auf die Verkehrssituation, den korrespondierenden Zielreiz (sog. *Target*), unterstützt. Eine Hauptdeterminante der Wirksamkeit dieses Hinweisreizes ist möglicherweise der Darbietungszeitpunkt (d.h. wie frühzeitig der Cue vor einer potentiellen Kollisionssituation dargeboten wird). Die Auswirkungen von verschiedenen Zeitintervallen zwischen einem Hinweisreiz und einem Zielreiz auf die Verarbeitungsgeschwindigkeit des Zielreizes wurden mehrfach mit dem sogenannten *Vorperioden-Paradigma* untersucht. Dabei stand zunächst die Frage im Mittelpunkt, welche Vorperiode (Zeit zwischen Cue und Zielreiz) zur schnellsten Reaktion auf einen Zielreiz führen würde (Woodrow, 1914). Auf Basis der vorhandenen Studien lässt sich jedoch kein optimales Zeitfenster der Vorperiode ableiten. Vielmehr zeigte sich eine Abhängigkeit der Versuchsergebnisse davon, ob die Vorperiode fix oder zufällig war (Niemi & Näätänen, 1981; Wagener & Hoffmann, 2010):

- Erfolgt die Präsentation des Zielreizes nach einer **fixen Vorperiode** (innerhalb des jeweiligen Versuchsblocks), nimmt die Reaktionszeit auf den Zielreiz mit steigender Vorperiode zu (sog. *fixed-foreperiod effect*). Reaktionszeiten sind demnach umso geringer, je kleiner das Zeitintervall zwischen Cue und Zielreiz ist, wenn dieser nach

einem festen Zeitintervall erwartet wird (Wagener & Hoffmann, 2010). Als Ursache wird die Abnahme der Reaktionsbereitschaft mit der Länge der Vorperiode (Niemi & Näätänen, 1981; Vallesi & Shallice, 2007) sowie die Schwierigkeit der Einschätzung längerer, im Vergleich zu kürzeren Zeitintervallen (Wearden & Lejeune, 2008) diskutiert.

- **Variiert die Vorperiode** zwischen den einzelnen Versuchsdurchgängen (innerhalb des jeweiligen Versuchsblocks), nimmt die Reaktionszeit auf den Zielreiz mit steigender Vorperiode ab (sog. *variable-foreperiod effect*). Reaktionszeiten sind folglich umso geringer, je größer das Zeitintervall zwischen Cue und Zielreiz ist, wenn dieser nicht nach einem festen Zeitintervall erwartet wird (Wagener & Hoffmann, 2010). Dieser Effekt wurde einerseits auf eine kontinuierliche Anpassung der angenommenen Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten des Zielreizes zurückgeführt (d.h. je länger die Vorperiode, desto wahrscheinlicher wird die Präsentation des Zielreizes, Näätänen, 1970; Wearden & Lejeune, 2008). Andererseits wurde der Effekt dadurch erklärt, dass Probanden die gleiche Vorperiode wie im vorangegangenen Versuchsdurchgang erwarten (Alegria-Iscoa, 1975; Karlin, 1959), wodurch die Probanden in Durchgängen mit kurzer Vorperiode meistens durch diese überrascht werden, da sie eine längere Vorperiode erwarten. Ist die Vorperiode länger als erwartet, können sich die Probanden hingegen leicht re-orientieren, da die erwartete Vorperiode offensichtlich abgelaufen ist.

Die Übertragbarkeit von Ergebnissen aus grundlagenorientierten Arbeiten auf den Forschungsgegenstand frühzeitiger Fahrerinformationen bei drohenden Verkehrskonflikten ist in zweierlei Hinsicht eingeschränkt: Einerseits liegt in den aufgeführten grundlagenorientierten Arbeiten ein statisches Versuchssetting vor, während es sich beim Anwendungsfall frühzeitiger Fahrerinformationen um ein dynamisches Versuchssetting handelt. Dabei haben die Fahrer die Möglichkeit, ihr Fahrverhalten in der Annäherung an die jeweilige Verkehrssituation, über die sie informiert wurden, zu verändern. Eine entsprechende Anpassung der Fahrgeschwindigkeit würde beispielsweise die zur Verfügung stehende Zeit zur Konfliktvermeidung vergrößern. Meist besteht in Grundlagenarbeiten jedoch zwischen der Darbietung von Hinweis- und Zielreizen keine Möglichkeit zur Interaktion oder Beeinflussung der Reizkonstellation, auf welche der Proband (nach einem fixen oder variablen Zeitintervall) reagieren muss. Außerdem muss in angewandten Kontexten typischerweise ein größeres visuelles Feld (bspw. zentrale Sicht durch die Windschutzscheibe, rückwärtige Sicht durch Spiegel) überwacht werden, als dies bei Grundlagenarbeiten (bspw. bei einem Reaktionszeitexperiment am Computerbildschirm) der Fall ist, so dass Hinweisreize leichter übersehen werden können.

Im folgenden Kapitel werden zunächst Arbeiten zur Eingrenzung des Warnzeitpunkts bei dringlichen Fahrerwarnungen dargestellt, um eine Grundlage für die Festlegung des Zeitfensters für frühzeitige Fahrerinformationen zu schaffen. Bisher vorliegende Arbeiten zur Auswirkung frühzeitiger Fahrerinformationen bei Verkehrskonflikten werden ebenfalls vorgestellt.

### 3.1.2 Angewandte Arbeiten

Um eine konsistente Nachrichtenübermittlung an den Fahrer zu gewährleisten, wird bei der Konzeption der Fahrerunterstützung in dieser Arbeit auf etablierte zeitliche Warnstrukturen, die vielfach beschrieben bzw. untersucht wurden (z.B., Brown et al., 2001; Lee et al., 2002; McGehee, Brown, Lee & Wilson, 2002), zurückgegriffen. Etablierte Konzepte zur Bestimmung des Warnzeitpunkts für dringliche Warnungen gehen davon aus, dass die Warnung zeitig genug erfolgen soll, damit der Fahrer die Kollision selbstständig vermeiden oder zumindest die Relativgeschwindigkeit zum jeweiligen Hindernis reduzieren kann.

Der Warnzeitpunkt lässt sich grundsätzlich aus zwei Komponenten ermitteln: Der Reaktionszeit des Fahrers auf den Alarm und der benötigten Zeit zur Durchführung der erforderlichen Geschwindigkeitsreduktion (ISO 15623:2013 (E)). Um das Fahrzeug

rechtzeitig vor einem nicht beschleunigten Hindernis zum Stehen zu bringen, kann der Warnzeitpunkt folgendermaßen bestimmt werden (SAE J 2400; ISO 15623:2013 (E)):

$$T_{\text{Warnung}} = T_{\text{Reaktionszeit}} + T_{\text{Verzögerung}}$$

$T_{\text{Reaktionszeit}}$  stellt die Zeit zwischen der Darbietung des Warnsignals und dem Beginn des Bremsingriffs des Fahrers dar. Die anschließend benötigte Zeit zur Geschwindigkeitsreduktion ( $T_{\text{Verzögerung}}$ ) hängt von der Ausgangsgeschwindigkeit und der angenommenen Verzögerung des Fahrers ab:

$$T_{\text{Warnung}} = T_{\text{Reaktionszeit}} + v/2a$$

Die konkrete Schwelle zur Ausgabe der Warnung ist somit abhängig von drei Freiheitsgraden: (1.) von der Ausgangsgeschwindigkeit, (2.) von Annahmen bezüglich der Reaktionszeit und (3.) von der vom Fahrer aufgetragenen Verzögerung. Internationale Standards gehen von einer Reaktionszeit von ca. einer Sekunde aus (ISO 15623:2013 (E): 0.8 s; SAE J2400: 1.18 s). Als passendes Zeitfenster zur Darbietung von Warnungen vor unmittelbar bevorstehenden Konflikten werden in relevanten Übersichtsarbeiten ebenfalls Intervalle von 0.7 s bis 1.5 s vorgeschlagen (z.B. Lenné & Triggs, 2009; Spence & Ho, 2008). Die Verzögerung, die maximal vom Fahrer aufgebracht werden kann, liegt zwischen  $-8 \text{ m/s}^2$  und  $-10 \text{ m/s}^2$  (Neukum et al., 2014; ISO 15623:2013 (E)).

Die Auswirkungen der Vorwarnzeit auf die Wirksamkeit von Warnungen wurde beispielsweise von McGehee et al. (2002) untersucht. Die Probanden mussten in einer Simulatorstudie auf ein plötzlich auftauchendes, stehendes Fahrzeug reagieren, wobei sie durch ein Warnsystem unterstützt wurden (rein auditive Warnung). Zwei Ausprägungen der Warnauslegung wurden miteinander verglichen. Entweder wurde von einer Reaktionszeit von 1 Sekunde ausgegangen (späte Warnung) oder von einer Reaktionszeit von 1.5 Sekunden (frühe Warnung). Die angenommene Verzögerung betrug  $-7.35 \text{ m/s}^2$ . Frühe, nicht aber späte Warnungen erwiesen sich gegenüber einer nicht-assistierten Bedingung als effektiv (stärkere Reduktion von Kollisionen und frühzeitigere Bremsreaktion).

Lee et al. (2002) untersuchten ebenfalls verschiedene Warnalgorithmen für Kollisionswarnungen im Fahrsimulator. Ausgehend von einer Reaktionszeit von 1.5 s wurde entweder eine maximale Verzögerung von  $-3.92 \text{ m/s}^2$  (frühe Warnung) oder  $-7.35 \text{ m/s}^2$  (späte Warnung) angenommen. Während Folgefahrten mussten Probanden auf unterschiedlich starke Bremsingriffe eines Vorderfahrzeugs reagieren. Verglichen mit einer Bedingung ohne Fahrerunterstützung führten sowohl frühe als auch späte Warnungen in dieser Studie zu einer Verringerung der Kollisionsrate, wobei frühe Warnungen im Hinblick auf die Reduktion der Kollisionsrate effektiver waren als späte Warnungen.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass frühzeitige Warnungen ein größeres Potential zur Steigerung der Fahrsicherheit aufweisen als späte Warnungen (siehe auch Abe & Richardson, 2004, 2005, 2006; Lee et al., 2002; McGehee et al., 2002; Werneke & Vollrath, 2013). Um Falschwarnungen zu vermeiden, werden in heutigen Kollisionsschutzsystemen dennoch späte Warnzeitpunkte gewählt (Winner, 2009). Die Gründe sind nachfolgend aufgeführt: Je früher die Ausgabe eines Signals erfolgt, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit eines falschen Alarms (z.B. McGehee et al., 2002; SAE J 2400; ISO 15623:2013 (E)). Des Weiteren tendieren Fahrer dazu, zu frühe Warnungen als Falschwarnungen zu interpretieren, insbesondere wenn der Grund für die Warnung nicht offensichtlich ist (Lee et al., 2002). Frühe Warnungen stellen außerdem eine mögliche Ablenkungsquelle dar. So wird Gefahrenquellen, vor denen gewarnt wurde, mehr Aufmerksamkeit geschenkt, während das Überprüfen alternativer Gefahrenquellen vernachlässigt wird. Man spricht hierbei vom sogenannten „*attentional tunneling effect*“ (Yeh & Wickens, 2001; Davison & Wickens, 2001).

In Anlehnung an diese Befunde muss auch das Zeitfenster für frühzeitige Fahrerinformationen eingegrenzt werden, da analoge Effekte zu Fahrerwarnungen zu erwarten sind. Für eine maximale Zuverlässigkeit und gleichzeitig minimale Ablenkung sollten die Informationen so spät wie möglich, aber so früh wie nötig gegeben werden, um

eine adäquate Fahrerreaktion einleiten zu können. Im Gegensatz zu dringlichen Fahrerwarnungen ist das optimale Zeitfenster für Fahrerinformationen noch nicht systematisch untersucht worden. Hinweise auf ein optimales Informationszeitfenster liegen folglich bisher nur vereinzelt vor. Im Folgenden wird exemplarisch auf Studien verwiesen, in denen die Wirksamkeit frühzeitiger Informations- oder Warnkonzepte gezeigt werden konnte.

Lenné et al. (2008) untersuchten beispielsweise die Wirksamkeit frühzeitiger Warnungen bei Verkehrskonflikten mit Einsatzfahrzeugen im Kreuzungsbereich. Verglichen wurden frühe und späte Warnungen, die sich jedoch in ihrer Ausgestaltung unterschieden. Die Probanden wurden in der Fahrsimulatorstudie bis zu 8 s vor einer drohenden Kollision mit einem kreuzenden oder abbiegenden Einsatzfahrzeug gewarnt. Dies geschah entweder mittels einer frühzeitigen visuell-auditiven Warnung (= "*advanced warning*", in Form einer blinkenden LED-Leiste mit Warnton) oder mittels simulierter Warnlichter am Einsatzfahrzeug und Sirene, die erst später wahrnehmbar waren (= "*standard warning*"). Bei der früheren Warnung fanden die Autoren stärkere Effekte auf die Annäherungsgeschwindigkeit an die Kreuzung als bei Standardwarnung oder ohne Warnung (ohne Warnung: Lichtsignal und Sirene des Einsatzfahrzeugs sind deaktiviert). Die Fahrer reduzierten ihre Geschwindigkeit bei größerer Entfernung zum Konfliktpunkt, was die generelle Wirksamkeit einer frühzeitigen Warnstrategie zeigt.

Werneke und Vollrath (2013) verglichen ebenfalls frühzeitige Warnungen vor einem Verkehrskonflikt im Kreuzungsbereich mit späten Warnungen. Die Teilnehmer der Fahrsimulatorstudie wurden über eine bevorstehende Konfliktsituation mit einem ausparkenden PKW entweder in der Kreuzungsanfahrt (Abstand: 70 Meter, frühe Warnung) oder erst, als das Fahrzeug mit dem Ausparken begonnen hatte, gewarnt. Die kritische Situation wurde ausgelöst, nachdem die Probanden an der Kreuzung ihre Geschwindigkeit aufgrund der Vorfahrtsregelung reduzieren mussten, und diese anschließend zum Abbiegen wieder erhöhten. Die Information wurde den Fahrern in dieser Studie im Head-Up Display dargeboten. Frühzeitige, nicht aber späte Warnungen führten zu einer Steigerung der Fahrsicherheit. Bei frühen Warnungen fanden sich, verglichen mit einer nicht-assistierten Fahrt, weniger Kollisionen, eine längere Haltezeit beim Erreichen der Kreuzung und eine weniger starke Beschleunigung beim Anfahren an der Kreuzung.

Yan, Xue, Ma und Xu (2014) verglichen in einer Simulatorstudie ebenfalls verschiedene Warnzeitpunkte im Kreuzungsbereich. Dabei wurden die Fahrer entweder drei (späte Warnung) oder fünf Sekunden (frühe Warnung) vor einer drohenden Kollision mit einem kreuzenden PKW, welcher den Probanden an einer ampelgeregelten Kreuzung in der Grünphase die Vorfahrt nahm, durch Sprachmitteilungen gewarnt. Die Warnung beinhaltete entweder eine Information über die Konfliktrichtung, oder nicht. Frühe Warnungen reduzierten die Kollisionsrate gegenüber einer nicht-assistierten Bedingung stärker als späte Warnungen, was auf eine schnellere Bremsreaktionszeit und eine stärkere Verzögerung zurückzuführen war.

Totzke et al. (2011a) untersuchten die Auswirkungen von Warnzeitpunkt und Spezifität bei Warnungen vor Stauenden auf Autobahnen. In einer Studie im dynamischen Fahrsimulator wurden Fahrer zu verschiedenen Zeitpunkten visuell-auditiv über bevorstehende Stauenden informiert. Die Warnungen beinhalteten entweder eine Entfernungsanzeige (d.h. Anzeige der verbleibenden Entfernung bis zum Stauende), oder nur die Anzeige, dass ein Stauende bevorsteht. Aktiviert wurde die Warnung entweder 300 m (ca. 8 Sekunden), 1500 m (ca. 42 Sekunden) oder 3500 m (ca. 97 Sekunden) vor Erreichen des Stauendes. Die Variation des Zeitpunkts hatte in dieser Studie keinen Effekt auf die Wirksamkeit der Warnungen (z.B. auf Bremsbeginn oder Bremsstärke bei Erreichen der Stauenden). Da sich diese Studie auf Autobahnsituationen bezieht, in denen zur Warnung weitaus größere Zeitfenster als bei urbanen Verkehrskonflikten zur Verfügung stehen, wird die Studie an dieser Stelle nur der Vollständigkeit halber genannt.

Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass dem Darbietungszeitpunkt der Fahrerinformationen bei urbanen Verkehrskonflikten für deren Wirksamkeit vermutlich eine

große Bedeutung zukommt. In Bezug auf dringliche Warnungen („*imminent crash warnings*“) liegen hierfür mittlerweile etablierte, internationale Standards vor, welche als Ausgangspunkt für die Eingrenzung der unteren Grenze des Zeitfensters für frühzeitige Fahrerinformationen dienen können. Die Wirksamkeit von frühzeitigen Warn- und Informationskonzepten wurde exemplarisch in mehreren Studien gezeigt. Bislang fehlt jedoch eine umfassende Evaluation verschiedener Zeitpunkte frühzeitiger Informationen sowie der Einbezug verschiedener Verkehrssituationen in diese Evaluation. Die erste Studie meiner Arbeit (Studie I, siehe Kapitel 4) hat deshalb zum Inhalt, die Auswirkungen verschiedener Informationszeitpunkte in einer breiten Auswahl an unterschiedlichen Situationen zu untersuchen.

## 3.2 Informationsinhalt

### 3.2.1 Grundlagenorientierte Arbeiten

Im Zentrum dieser Arbeit steht die Gestaltung einer Fahrerunterstützung zur Vermeidung urbaner Verkehrskonflikte. Der Fahrer muss in diesen Situationen seine Aufmerksamkeit zu einem bestimmten Zeitpunkt auf ein kritisches Verkehrsobjekt an einem spezifischen Ort in der Verkehrsumgebung ausrichten, das Kollisionspotential richtig einschätzen und angemessen reagieren. Gerade in urbanen Fahrsituationen müssen Fahrer meist mehrere Orte, an denen sich mögliche Konfliktpartner befinden könnten, für einen längeren Zeitraum parallel beobachten. Bei der Anfahrt an eine Kreuzung müssen beispielsweise beide Kreuzungsarme überwacht werden, um Konflikte mit kreuzenden Verkehrsteilnehmern zu verhindern. Gleichzeitig könnten Verkehrskonflikte mit querenden Fußgängern oder ausparkenden Fahrzeugen entstehen.

Durch frühzeitige Fahrerinformationen soll die Kontrolle der visuellen Aufmerksamkeit des Fahrers unterstützt werden. Infolge der Darbietung einer Fahrerinformation soll der Fahrer seine Aufmerksamkeit auf einen bestimmten Ort in der Verkehrsumgebung, an dem sich ein bestimmter Verkehrsteilnehmer befindet, ausrichten. Dies bedeutet gleichzeitig, dass nicht-relevante Orte und Verkehrsobjekte vernachlässigt werden, was als sogenannte *selektive Aufmerksamkeit* begriffen werden kann. Ein wesentliches Ziel der Kontrolle visueller Aufmerksamkeit besteht bei diesem Ansatz in der bevorzugten Verarbeitung von Informationen, die für zielgerichtetes Verhalten relevant sind (Posner, 1980) bei gleichzeitiger Unterdrückung nicht verhaltensrelevante Informationen (Broadbent, 1958; Treisman & Gelade, 1980). Eine populäre Metapher zur Beschreibung der Aufmerksamkeitsausrichtung stellt die *Spotlight*-Metapher dar. Ähnlich einem Scheinwerferlicht wird die Aufmerksamkeit auf bestimmte Orte gerichtet, die dadurch stärker „beleuchtet“ werden, wohingegen andere Orte schwächer „beleuchtet“ werden.

Die Ausrichtung der visuellen Aufmerksamkeit auf bestimmte Orte wurde beispielsweise innerhalb des *spatial cueing* Paradigmas untersucht (Posner, 1980; Posner, Snyder & Davidson, 1980). Beim klassischen Cueing-Paradigma besteht die Aufgabe des Probanden darin, den Blick auf ein zentrales Fixationskreuz zu richten und auf Zielreize in der (nicht-fovealen) Peripherie zu reagieren (z.B. rechts oder links vom Fixationskreuz). Vor der Darbietung des Zielreizes wird ein Hinweisreiz (Cue) dargeboten, der eine Information über den wahrscheinlichen Ort des Zielreizes beinhaltet (bspw. ein Pfeil, der in die Richtung des Zielreizes zeigt). Valide Cues (d.h. Ort des Zielreizes entspricht der Information, die der Cue liefert) führen in der Regel zu schnelleren Reaktionszeiten, während invalide Cues (d.h. Ort des Zielreizes entspricht nicht dem Cue) zu verlängerten Reaktionszeiten führen (Lu & Doshier, 1998; Posner et al., 1980). Grundsätzlich werden zwei Arten von Cues unterschieden, welche die Kontrolle der Aufmerksamkeit auf unterschiedliche Weise unterstützen (Berger, Henik & Rafal, 2005; Jonides, 1981; Posner, Nissen & Ogden, 1978; Posner et al., 1980): *Endogene* und *exogene Cues*. *Endogene Cues* enkodieren die Richtung des Zielreizes symbolisch, beispielsweise durch einen Pfeil, der in die Richtung des wahrscheinlichen Präsentationsorts zeigt, oder ein Wort, welches die Konfliktichtung semantisch enkodiert. Diese Hinweisreize benötigen eine willkürliche Orientierung der

Aufmerksamkeit an den Ort, an dem der Zielreiz erscheinen könnte und unterstützen somit die *top-down* Kontrolle der Aufmerksamkeit. Im Kontext dieser Arbeit stellen beispielsweise Warn- oder Informationssymbole, welche auf einem Display angezeigt werden, endogene Cues dar. *Exogene Cues* erscheinen direkt an der Stelle des Zielreizes und führen zu einer unwillkürlichen Aufmerksamkeitsausrichtung an den Ort des Zielreizes, beispielsweise durch einen blinkenden oder plötzlich auftauchenden Reiz (*bottom-up* Verarbeitung). Im Kontext von Fahrerwarnungen und Informationen könnten exogene Cues darin bestehen, dass der jeweilige Konfliktpartner in der Verkehrssituation in einem kontaktanalogen Head-Up Display<sup>5</sup> direkt markiert wird (z.B. durch farbliche Hervorhebung).

Die Studien zum *spatial cueing* Paradigma zeigen zusammengefasst, dass die Aufmerksamkeit durch Cueing an Punkte außerhalb des Fixationspunkts gerichtet werden kann, so dass beim Eintreten des Zielreizes eine schnellere Reaktion möglich ist (sog. räumliche Aufmerksamkeit, Wentura & Frings, 2010). Durch den Richtungs-Cue werden kurzfristige Erwartungen über den wahrscheinlichen Erscheinungsort aktiviert, was zu einer schnelleren Reaktion auf den Zielreiz führt (Kingstone, 1992; Reuss, Kiesel, Kunde & Würh, 2012). Dies zeigten auch Reuss et al. (2012), die in einer *spatial cueing* Aufgabe Richtungs-Cues in Form von Buchstaben präsentierten. Diese zeigten den wahrscheinlichen Präsentationsort des Zielreizes an, trugen jedoch keine räumliche Bedeutung (im Gegensatz zu Pfeilen oder Handgesten, die in die Richtung eines Zielreizes zeigen). Die Hinweisreize wurden entweder sichtbar (bewusste Wahrnehmung möglich) oder maskiert (keine bewusste Wahrnehmung möglich) zentral dargeboten. Valide Hinweisreize führten zu einer schnelleren Reaktion auf Zielreize, was dafür spricht, dass die Probanden räumliche Erwartungen über die Position des Zielreizes ausbildeten und ihre Aufmerksamkeit entsprechend ausrichteten. Bemerkenswert ist, dass dies ebenfalls für Hinweisreize galt, die nicht bewusst wahrnehmbar waren.

Zusammengenommen sprechen die Ergebnisse des *spatial cueing* Paradigmas dafür, Richtungs-Cues zur Unterstützung der Ausrichtung der visuellen Aufmerksamkeit auf bestimmte Orte in der Verkehrsumgebung zu verwenden. Gerade in Bezug auf kritische Verkehrssituationen ist möglicherweise neben der Anzeige der Richtung, aus der sich ein potentieller Konfliktpartner an den gemeinsamen Konfliktpunkt nähert, auch die Art des Konfliktpartners (z.B. Fußgänger oder PKW) von Interesse. Zusätzlich zur räumlichen Fokussierung der Aufmerksamkeit durch Hinweisreize haben grundlagenorientierte Studien gezeigt, dass Probanden ebenfalls schneller reagieren, wenn sie Erwartungen über andere Eigenschaften des Zielreizes (Duncan, 1984; Lambert, 1985), wie beispielsweise die Form (Broadbent, 1982; Posner & Snyder, 1975), Farbe (Humphreys, 1981) oder Klasse des Zielreizes (Neely, 1977) besitzen. Wentura und Frings (2010) unterscheiden beispielsweise objektbasierte Aufmerksamkeit (Ausrichtung auf ein bestimmtes Objekt, unabhängig von dessen Ort), merkmalsbasierte Aufmerksamkeit (Ausrichtung auf ein bestimmtes Objektmerkmal) und zeitliche Aufmerksamkeit (Ausrichtung auf zeitliche Merkmale).

Eine relevante Frage in Bezug auf die vorliegende Arbeit ist, ob die Effekte räumlicher Erwartungen von Stimuli und die Effekte von Erwartungen von Reizeigenschaften (bspw. Form des Zielreizes) unabhängig voneinander sind. Mit anderen Worten: Erleichtert die Ausrichtung der Aufmerksamkeit auf einen bestimmten Ort die Verarbeitung aller oder nur bestimmter Stimuli, für die eine zusätzliche Erwartung über ihre Eigenschaften vorliegt? Diese Frage wurde in mehreren Arbeiten bearbeitet (Kingstone, 1992; Klein & Hansen, 1990; Lambert & Hockey, 1986), welche im Folgenden vorgestellt werden.

Es existieren Hinweise, dass räumliche Cueing-Effekte nur dann eintreten, wenn gleichzeitig eine Erwartung über die Art des Zielreizes vorliegt (d.h. nur erwartete Stimuli werden aufgrund räumlichen Cueings bevorzugt verarbeitet). In einer Studie von Klein und Hansen (1990, Experiment 1 und 2) erhielten Probanden einen räumlichen Cue in Form eines Pfeils

---

<sup>5</sup> Sogenannte kontaktanaloge Head-Up Displays erlauben es, Informationen und Warnungen direkt in die Fahrumgebung einzublenden (siehe bspw. Plavšić, Duschl, Tönnis, Bubb & Klinker, 2009; Schall et al., 2013).

auf die linke oder rechte Seite eines Fixationskreuzes, gefolgt von einem peripheren Zielreiz. Dieser bestand darin, dass einer von zwei möglichen Punkten (links/rechts des Fixationskreuzes) schwächer oder stärker beleuchtet wurde. Die Probanden mussten, nachdem sich die Helligkeit einer der beiden Punkte verändert hatte, per Tastendruck entscheiden, ob der Punkt jeweils heller oder dunkler geworden war. Die Zielreize (heller oder dunkler werdender Punkt) befanden sich jeweils mit einer höheren Wahrscheinlichkeit auf einer der beiden Seiten des Fixationskreuzes. Somit war ebenfalls eine (Wahl)Reaktion wahrscheinlicher, wenn der Zielreiz auf der erwarteten Seite neben dem Fixationskreuz erschien. Es fanden sich keine generellen Reaktionszeitvorteile durch die räumlichen Hinweisreize. Räumliche Cueing-Effekte zeigten sich nur, wenn der Stimulus am jeweiligen Ort ebenfalls wahrscheinlicher war, nicht aber wenn es sich um einen unwahrscheinlichen Stimulus handelte. Die Ergebnisse sprechen somit dafür, dass nicht alle Zielreize durch einen räumlichen Hinweisreiz in gleicher Weise bevorzugt verarbeitet werden. Es muss allerdings angemerkt werden, dass in dieser Studie Stimulus-Reaktions-Erwartung und Stimulus-Erwartung konfundiert waren, was eine eindeutige Interpretation der Ergebnisse erschwert (siehe hierzu Kingstone, 1992).

Andere Studien haben Effekte von mehrdimensionalen Hinweisreizen (z.B. Cues über Ort und Form des Zielreizes gleichzeitig) untersucht. In einer Studie von Lambert und Hockey (1986, Experiment 1) sollten Probanden per Tastendruck entscheiden, ob ein Zielreiz, der entweder eine Ellipsen- oder eine Diamantform besaß, horizontal oder vertikal orientiert war. Die Zielreize erschienen jeweils rechts oder links von einem Fixationskreuz, wobei die Darbietungsorte der beiden Stimuli unterschiedlich wahrscheinlich waren. Die Probanden erhielten vor der Präsentation des Zielreizes einen Richtungs- und Form-Cue. Der Richtungs-Cue bestand aus einer horizontalen Linie, die nach links oder rechts über das Fixationskreuz hinausragte (Validität: 66%). Der Form-Cue bestand entweder aus einem Kreis (Zielreiz: Ellipse) oder einem Viereck (Zielreiz: Diamant; Validität: 66%). Unabhängig von einem zusätzlichen Richtungs-Cue reagierten die Probanden schneller auf die Reize, wenn diese am jeweils wahrscheinlicheren Ort erschienen. Richtungs-Cues senkten ebenfalls die Reaktionszeit. Die Studienergebnisse legen somit einen additiven Mechanismus von Richtungs-Cues und Cues über die Art des Zielreizes nahe. Bei der Interpretation der Studie ist zu beachten, dass die Validität des Hinweisreizes in diesem Fall relativ gering war (66%).

Kingstone (1992) berichtet mehrere Studien, in denen Probanden entscheiden sollten, ob ein Zielreiz, der aus den Buchstaben „A“ oder „V“ bestand, auf dem Kopf stand oder nicht. Vor der Präsentation des Zielreizes wurde ein Cue in Form von zwei unabhängigen Elementen gegeben, die sowohl die wahrscheinliche Form als auch den wahrscheinlichen Ort des Zielreizes beinhalteten (Cue-Validität: 80%). Der Cue über die Richtung (Pfeil nach links/rechts; Neutral: horizontale Linie) wurde jeweils unter dem Form-Cue (Zahl „1“: Zielreiz = A; Zahl „2“: Zielreiz = V; Neutral: „+“) dargeboten. Die Ergebnisse sprechen für eine Interaktion aus Richtungs- und Form-Erwartungen. Einerseits zeigte sich eine Reduktion des räumlichen Cueing-Effekts (neutraler vs. valider Richtungs-Cue), wenn eine nicht-erwartete Form am erwarteten Ort erschien. Andererseits fand sich ein stärkerer Anstieg der Reaktionszeit bei nicht-validem Richtungs-Cue (neutraler vs. unvalider Richtungs-Cue), wenn eine erwartete Form an einer nicht-erwarteten Stelle erschien.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Lenkung der visuellen Aufmerksamkeit und die damit einhergehende Erleichterung der Verarbeitung von Zielreizen durch Hinweisreize mehrfach gezeigt wurde. Verschiedene Arten von Hinweisreizen, beispielsweise über den wahrscheinlichen Ort des Zielreizes oder dessen Eigenschaften führen in diesem Kontext zu einer schnelleren Verarbeitung des jeweiligen Zielreizes. Im Kontext von Fahrerwarnungen und -informationen können diese Erkenntnisse für die Gestaltung der an den Fahrer übermittelten Informationen genutzt werden. Allerdings muss eine möglicherweise eingeschränkte Übertragbarkeit der Ergebnisse auf ein dynamisches Versuchssetting berücksichtigt werden.

### 3.2.2 Angewandte Arbeiten

Es existieren diverse Richtlinien und Gestaltungsempfehlungen, welche den Inhalt der an den Fahrer zu übermittelnden Informationen bei Fahrerwarnungen und -informationen spezifizieren (bspw. Dingus, Jahns, Horowitz & Knipling, 1998; Rhede et al., 2011; International Harmonized Research Activities (IHRA) working group on Intelligent Transport Systems (ITS), 2008; P. Green, Levison, Paelke & Serafin, 1993; Campbell, Carney & Kantowitz, 1997; COMSIS Corporation, 1996). Basierend auf diesen Übersichtsarbeiten lassen sich Empfehlungen an den Informationsgehalt von frühzeitigen Fahrerinformationen ableiten: Es wird vorgeschlagen, zusätzlich zur Anzeige, dass ein drohender Konflikt vorliegt (unspezifische Warnung), die Kategorie des jeweiligen Konfliktpartners (z.B. PKW, Radfahrer oder Fußgänger, sog. **Konfliktspezifität**) und die Richtung, aus welcher der Konflikt droht (sog. **Richtungsspezifität**), in die Fahrerinformation zu integrieren. Außerdem ist vorstellbar, zusätzliche Informationen über den noch verbleibenden Abstand zum Konfliktpunkt (sog. **Abstandsspezifität**) oder über die prognostizierte Wahrscheinlichkeit, dass der Verkehrskonflikt eintritt (sog. **Risikospezifität**) an den Fahrer zu übermitteln.

Die beiden letztgenannten Arten der Spezifität (Abstands- und Risikospezifität) wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht empirisch untersucht und sind an dieser Stelle nur der Vollständigkeit halber aufgeführt. Einschlägige Arbeiten, die Warn- oder Informationskonzepte vorgestellt und untersucht haben, werden im Folgenden vorgestellt. Die Studien werden hierbei jeweils nach der Art der an den Fahrer übermittelten Informationen in Teilkapiteln berichtet.

#### 3.2.2.1 Darstellung des Konfliktpartners (sog. Konfliktspezifität)

In diesem Kapitel werden Arbeiten vorgestellt, die sich mit konfliktspezifischen Warnkonzepten beschäftigten. Cacciabue & Martinetto (2006) stellten beispielsweise ein Assistenzkonzept für Verkehrskonflikte mit verschiedenen möglichen Konfliktpartnern vor. Es wurde ein zweistufiges Assistenzkonzept verfolgt, dessen Ausgaben in einer frühzeitigen Anzeige eines unspezifischen Warndreiecks (sog. „*cautionary mode*“) und einer konfliktspezifischen visuell-auditiven Warnung (sog. „*imminent mode*“, Darstellung der Art des Konfliktpartners) bestanden. Evaluationsergebnisse der Auswirkungen der Fahrerunterstützung auf das Fahrverhalten werden in dieser Arbeit jedoch nicht berichtet.

Ho und Cummings (2005, vgl. auch Cummings, Kilgore, Wang & Kochhar, 2007) verglichen in einer Fahrsimulatorstudie unterschiedliche, spezifische auditive Warnungen (*multiple alarm*) mit unspezifischen Warnsignalen (*single alarm*). Die Probanden wurden mit verschiedenen kritischen Fahrereignissen konfrontiert, welche die Darbietung der folgenden Warnungen auslösten:

- Frontalkollisionswarnung (*Frontal Collision Warning, FCW*): Die Probanden wurden während der Fahrt bei verschiedenen Verkehrskonflikten im Längsverkehr durch FCW unterstützt. Bei den hier verwendeten Szenarien handelte es sich unter anderem um ein entgegenkommendes Fahrzeug auf dem eigenen Fahrstreifen, ein plötzlich bremsendes Vorderfahrzeug, ein plötzlich ausparkendes Fahrzeug am Straßenrand oder einen umgefallenen Baum, der den Fahrstreifen blockiert.
- Warnung vor sich schnell annäherndem rückwärtigen Verkehr (*Rear Collision Warning, RCW*): Ein rückwärtiges Fahrzeug näherte sich dem simulierten Probandenfahrzeug mit hoher Relativgeschwindigkeit, wodurch ein RCW ausgelöst wurde.
- Spurverlassenswarnung (*Lane Departure Warning, LDW*): Starker Seitenwind erschwerte die Spurhaltung und führte zu einem starken Spurversatz, wodurch eine LDW ausgelöst wurde.

Die Probanden wurden entweder konfliktspezifisch oder unspezifisch gewarnt (*multiple alarm* vs. *single alarm*; between-subjects Faktor). Im Fall von konfliktspezifischen Warnsignalen wurde für jede Warnung eine spezifische auditive Warnung dargeboten (FCW: „*Warning,*

*Warning*“; RCW: „*Hazard, Hazard*“, LDW: „*Beep*“). Die Probanden absolvierten alle Szenarien unter zwei Ablenkungsbedingungen (mit vs. ohne visuelle-kognitive Ablenkung, within-subject Faktor). Die Ablenkung bestand in der Bearbeitung einer Nebenaufgabe, die auf einem Display im Fahrzeug angezeigt wurde. Aufgabe der Fahrer war es, eine Zahlenkombination aus Nullen und Nicht-Nullen nach einer Kalkulationsvorschrift zu einer Antwort zu kombinieren (Vorschrift: Antwort = Position der Zahl innerhalb des Suchstrings + Wert der Zahl, bspw. „0-0-4-0-0-0“: Antwort = „7“). Die Reaktionszeit auf die Verkehrereignisse wurde folgendermaßen bestimmt:

- FCW: Zeit zwischen Alarm und Initiierung einer starken Bremsung (Bremsstärke > 2.5x„normales Bremsen“) oder eines starken Lenkeingriffs (Lenkradwinkel > 5°)
- RCW: Zeit zwischen Alarm und Initiierung einer Beschleunigung (Beschleunigung > 2x„normale Beschleunigung“) oder starker Lenkeingriff (Lenkradwinkel > 5°)
- LDW: Zeit zwischen Alarm und Initiierung einer Lenkreaktion in die Gegenrichtung des Windstoßes

Spurverlassenswarnungen konnten nicht konsistent hergestellt werden, da die simulierten Windstöße nicht zu einem ausreichend großen Spurversatz zur Auslösung der Warnungen führten, so dass keine Reaktionszeiten berechnet werden konnten. Bei den Reaktionszeiten auf die beiden anderen Warnungen zeigten sich keine Unterschiede zwischen konflikt-spezifischen („*multiple alarms*“) und konflikt-un-spezifischen Warnungen („*single alarm*“). Beeinflusst wurden die Reaktionszeiten im Wesentlichen durch den Faktor Ablenkung und die Art der Warnung (FCW vs. RCW).

Thoma, Lindberg & Klinker (2009) verglichen ebenfalls die Auswirkungen von unspezifischen (*generic warning*) und spezifischen Warnungen (*specific warning*) auf Bremsreaktionszeiten in verschiedenen urbanen Konfliktsituationen. In einem statischen Fahrsimulator sitzend, betrachteten die Versuchsteilnehmer ein Video, in dem verschiedene Verkehrssituationen vorkamen (siehe Abbildung 4 links für eine Übersicht der Szenarien). Die Probanden hatten die Aufgabe, das Bremspedal zu betätigen, wenn sie die Situation als potentiell gefährlich einschätzten. Die Szenarien wurden von jedem Probanden in vier verschiedenen Bedingungen absolviert.

- Entweder waren die Konfliktpartner in den Szenarien verdeckt („*difficult to detect*“),
- die Probanden bearbeiteten eine visuell-manuelle Trackingaufgabe während des Betrachtens des Videos<sup>6</sup> („*secondary event*“),
- es wurde eine Warnung dargeboten, obwohl es zu keiner kritischen Situation kam („*false alarm*“), oder
- es wurde keine Warnung dargeboten („*miss*“).

Die beiden Varianten „*false alarm*“ und „*miss*“ wurden eingeführt, um Lerneffekte der Probanden zu minimieren. Die Probanden wurden visuell-auditiv etwa drei Sekunden vor dem Erreichen des kritischen Verkehrereignisses gewarnt (außer in der Szenarienvariante „*miss*“), wobei die visuelle Anzeige entweder konflikt-spezifisch (Art des Konflikts wird angezeigt) oder unspezifisch war (siehe Abbildung 4 links). Gemessen wurde die Reaktionszeit der Probanden als Zeit zwischen Darbietung der Warnung und Bremspedalbetätigung.

---

<sup>6</sup> Die Nebenaufgabe wurde auf einem Bildschirm in der Fahrerkabine dargeboten. Über ein Steuerelement mussten die Probanden eine sich horizontal bewegende Linie in der Mitte des Displays halten.

Situation description	Warning icon	Scenario type				
		No warning/miss	Difficult to detect		Secondary event	
			Generic warning	Specific warning	Generic warning	Specific warning
Forward collision warning (FCW)						
Left/right cross traffic collision warning (CTW)						
Oncoming traffic warning (OTW)						
Pedestrian warning (PW)						
Red traffic light warning (TLW)						
Stop sign warning (SW)						
Generic warning (GW)						

Warning system	Scenario	Difficult to detect		Secondary event	
		Generic warning	Specific warning	Generic warning	Specific warning
FCW	0.75 (0.4)	1.5 (0.4)	1.4 (0.4)	1.0 (0.3)	1.1 (0.3)
CTW	1.3 (0.3)	0.9 (0.3)**	1.2 (0.5)	1.4 (0.2)	1.4 (0.3)
OTW	1.4 (0.5)	1.9 (0.3)	2.1 (0.3)	1.5 (0.7)	1.9 (0.7)
PW	1.77 (0.8)	0.9 (0.4)	0.7 (0.3)	1.5 (0.4)	1.4 (0.5)
TLW	1.6 (0.8)	1.7 (0.5)	1.3 (0.5)†	1.1 (0.4)	1.0 (0.4)
SW	1.81 (0.3)	(not enough samples)		1.4 (0.3)	1.5 (0.3)

\* Significantly shorter reaction times under the *specific* icon condition      \*\* Significantly shorter reaction times under the *generic* icon condition

Abbildung 4: Versuchsszenarien und verwendete Symbole (links) sowie mittlere Reaktionszeiten (rechts, in Klammern: Standardabweichung) bei konfliktspezifischen („specific warning“) und konfliktunspezifischen Warnungen („generic warning“) sowie ohne Warnung („no warning/miss“, aus Thoma et al., 2009, S.4ff.)

Bis auf wenige Ausnahmen fanden sich keine Unterschiede in den Reaktionszeiten zwischen spezifischen und unspezifischen Warnungen (siehe Abbildung 4, rechts). Im Szenario *Forward collision warning* scheint die Reaktionszeit der Probanden ohne Warnung geringer auszufallen als mit Warnung. Im Szenario „Red traffic light warning“ (Variante „difficult to detect“) reagierten die Probanden schneller auf konfliktspezifische als auf unspezifische Warnungen, wohingegen sich im Szenario „Left/right cross traffic collision warning“ (Variante „difficult to detect“) der entgegengesetzte Effekt zeigte. Zu beachten ist, dass sowohl Fahraufgabe (aufgrund der fehlenden Notwendigkeit der Querführung) als auch die untersuchten Szenarien in dieser Studie wenig komplex waren – die Ereignisse erforderten keine unterschiedlichen Reaktionen und wurden immer in der Frontansicht dargeboten.

Werneke et al. (2011) verglichen in einer Simulatorstudie visuelle Informationen unterschiedlicher Konfliktspezifität über bevorstehende Stau- oder Nebelereignisse auf Autobahnen. Die Probanden wurden auf eine von drei Arten über die Ereignisse informiert: (1.) Über einen sogenannten Kollisionsradar (auf einem Display färben sich mehrere Ringe um ein Abbild des Ego-Fahrzeugs an der Stelle ein, die mit der Richtung, aus der eine Gefahr droht, übereinstimmt) *ohne* Information über die Gefahrenart („Achtung“, sog. generisches Konzept), (2.) über einen Kollisionsradar *mit* Information über die Gefahrenart („Stau voraus“ bzw. „Nebel voraus“, sog. gemischtes Konzept) oder (3.) ohne Kollisionsradar *mit* Information über die Gefahrenart („Stau voraus“ bzw. „Nebel voraus“, sog. spezifisches Konzept). Bei weiterer Annäherung an das Ereignis wurden die Probanden in einer zweiten Stufe zusätzlich gewarnt („Bremsen“). Alle Konzepte führten zu einer Reduktion der Geschwindigkeit nach Darbietung der Informationsstufe. Nach Darbietung der Warnstufe reduzierten die Probanden die Geschwindigkeit noch weiter, wobei die stärksten Effekte auf die Geschwindigkeit bei dem spezifischen Konzept beobachtet wurden.

Totzke und Volk (2013) verglichen in einer Simulatorstudie die subjektiven Nützlichkeitsbeurteilungen von konfliktspezifischen (z.B. „Tiere auf Fahrbahn“) und konfliktunspezifischen Hinderniswarnungen (z.B. „Gefahrenstelle“) auf Autobahnen. Die Probanden berichteten von einer höheren Verkehrssicherheit und Verständlichkeit der konfliktspezifischen Warnungen. Objektive Daten zur Evaluation des Fahrverhaltens und der Situationskritikalität berichten die Autoren hingegen nicht.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Arbeiten zur Konfliktspezifität meist keinen Vorteil konfliktspezifischer gegenüber konfliktunspezifischer Warnungen auf das Fahrverhalten zeigen konnten (Cummings et al., 2007; Ho & Cummings, 2005; Thoma et al.,

2009; Zarife, 2014). Cummings et al. (2007) weisen darauf hin, dass unspezifische Warnsignale unter Umständen schneller interpretiert werden könnten als spezifische Signale. Somit ist fraglich, ob die zusätzlichen Informationen, über die reine Information *dass* ein Konflikt droht, hinaus, einen günstigen Effekt auf das Fahrverhalten zeigen. Andererseits wurde eine Steigerung der Nutzerakzeptanz durch konfliktspezifische Warnungen gezeigt (Totzke & Volk, 2013). Eine weitere mögliche Erklärung dafür, dass bisherige Studien keine positiven Effekte von konfliktspezifischen Anzeigen auf das Fahrverhalten finden konnten, besteht darin, dass die untersuchten Anzeigen meist nicht mit einer Information über die Konfliktrichtung kombiniert wurden. Wie in Abschnitt 3.2.1 dargelegt, könnte es durchaus sein, dass für eine effektive Lenkung der Fahreraufmerksamkeit auf einen spezifischen Konfliktpartner in der Verkehrsumgebung die Kombination aus Richtungs- und Konfliktspezifität der Fahrerinformationen erforderlich ist.

### 3.2.2.2 Darstellung der Konfliktrichtung (sog. Richtungsspezifität)

Neben der Darstellung der Art des Konfliktpartners legen die Ergebnisse von Grundlagenarbeiten nahe (siehe Abschnitt 3.2.1), die Richtung, aus der ein Konflikt droht, in die Warnung bzw. Information zur Wirksamkeitssteigerung zu integrieren (siehe hierzu Beispiele in Abbildung 5).



Abbildung 5: Beispiele für richtungsspezifische Informations- (oben) und Warnsymbole (unten, nach Fuerstenberg et al., 2007). Das Konzept wurde innerhalb des Forschungsprojekts INTERSAFE vorgestellt. Evaluationsergebnisse in Bezug auf die Fahrerreaktion werden nicht berichtet.

Auf Basis der verfügbaren angewandten Studien zur Richtungsspezifität von Informationen bzw. Warnungen kann jedoch nicht endgültig entschieden werden, ob diese mit günstigen Effekten auf das Fahrverhalten verbunden sind. Es finden sich sowohl Studien, die Anhaltspunkte auf schnellere Fahrerreaktionen infolge richtungsspezifischer Warnungen bieten (Weller et al., 2014; Zarife, 2014; Zhang et al., 2014), als auch solche Studien, die keinen Nutzen richtungsspezifischer Warnungen finden (Bliss & Acton, 2003; Fricke, 2009; Yan et al., 2014).

Bliss und Action (2003) untersuchten unspezifische (Experiment 1) und richtungsspezifische auditive Warnungen (Experiment 2) in einem statischen Fahrsimulator und variierten dabei die Zuverlässigkeit der Warnungen (50%, 75% oder 100% korrekte Alarmer). In beiden Experimenten mussten die Probanden während der Simulatorfahrt auf sich schnell annähernden rückwärtigen Verkehr reagieren, der sich aus verschiedenen Richtung an das simulierte Probandenfahrzeug annäherte (links, zentral oder rechts). Die Aufgabe der Probanden bestand darin, die drohende Kollision mit dem sich annähernden Fahrzeug durch eine Lenkbewegung zu verhindern. Beide Studienteile wurden direkt hintereinander von denselben Versuchsteilnehmern absolviert (erster Studienteil: richtungsunspezifische Warnungen, zweiter Studienteil: richtungsspezifische Warnungen). Mit abnehmender

Zuverlässigkeit der Warnungen nahm der Anteil an Probanden, die eine Reaktion auf die Warnungen zeigten, ab, während die Kollisionsrate zunahm. Die Autoren berichten von einer besseren Fahrleistung (Häufigkeit von Reaktionen auf die Alarme, Kollisionsrate) bei richtungsspezifischen Alarmen, jedoch auch von häufigerem Auftreten von Situationen, in denen die Probanden zunächst in die falsche Richtung lenkten (d.h. in die Richtung des Warntons<sup>7</sup>). Anzumerken ist, dass die Ergebnisse dieser Studie mit einem Übungseffekt aufgrund der fixen Abfolge der beiden Studienteile konfundiert sind.

Zhang et al. (2014) verglichen ebenfalls auditive Warnungen in Form von Sprachausgaben mit und ohne Richtungsinformation in einer Studie im Fahrsimulator. Bei der Studie näherten sich die Probanden mehreren ampelgesteuerten Kreuzungssituationen in der Grünphase an. Beim Erreichen der Kreuzungen wurde den Probanden durch einen kreuzenden PKW die Vorfahrt genommen. Die Warnungen beinhalteten eine Information über den Konfliktpartner und wurden vier Sekunden vor dem Erreichen des Konfliktpunkts entweder richtungsspezifisch (*“please watch out for the vehicle running the red light on your right”*) oder richtungsunspezifisch (*“please watch out for the vehicle running the red light”*) dargeboten. Alle Probanden absolvierten beide Warnbedingungen und eine Fahrt ohne Fahrerunterstützung. Im Vergleich zur Fahrt ohne Unterstützung reduzierten richtungsspezifische und richtungsunspezifische Warnungen die Kollisionsrate in gleicher Weise (Baseline: 38.60%, richtungsspezifisch: 0%, richtungsunspezifisch: 0%). Außer der Kollisionsrate wurden keine weiteren Variablen zur Beschreibung der Situationskritikalität berichtet. Als Maß der Fahrerreaktion wurde die Bremsreaktionszeit in dieser Studie als Zeit zwischen der Aktivierung des kreuzenden Verkehrsteilnehmers (ca. 7 Sekunden vor Erreichen der Kreuzung) und dem Bremsbeginn berechnet. Richtungsspezifische Warnungen führten zu geringeren Bremsreaktionszeiten ( $M = 3.07$  s) als richtungsunspezifische Warnungen ( $M = 3.38$  s). Da die Autoren in Bezug auf diesen Vergleich keine Kontraste zwischen den Bedingungen berichten, kann jedoch keine zufallskritische Bewertung der Ergebnisse erfolgen.

Yan et al. (2014) verwendeten dieselbe Versuchsanordnung wie Zhang et al. (2014) und variierten zusätzlich den Warnzeitpunkt. Insgesamt wurden fünf Versuchsbedingungen in einem abhängigen Versuchsdesign erhoben. Die Probanden erhielten entweder keine Warnung oder Warnungen, die sich in Zeitpunkt (3 s vs. 5 s vor Erreichen des Kollisionspunkts) und Richtungsspezifität (unspezifisch: *„alert to the red-light running vehicle“*; spezifisch: *„alert to the red-light running vehicle from right side“*) unterschieden. Die Autoren berichten einen Einfluss des Warnzeitpunkts, nicht aber der Richtungsspezifität auf die Bremsreaktionszeit (gemessen ab Beginn der Situation) und die Kollisionsrate.

Weller et al. (2014) untersuchten ebenfalls richtungsspezifische und richtungsunspezifische Warnungen. Probanden in dieser Studie betrachteten kurze Videos, die mit Hilfe einer Fahrsimulationssoftware aufgenommen wurden, auf einem Bildschirm. Die Videos zeigten urbane Fahrsequenzen, in denen an bestimmten Stellen ein Fußgänger die Fahrbahn überquerte. Aufgabe der Probanden war es, mit oder ohne Unterstützung durch ein Warnsystem auf dieses kritische Ereignis zu reagieren (between-design). Die Versuchspersonen starteten die Videos mit Betätigen des Gaspedals und sollten dieses solange gedrückt halten, bis ein Bremsen notwendig wurde. Die Fahrerwarnung wurde mit Erscheinen des Zielreizes dargeboten. Die TTC bei Auslösung der Warnung variierte zwischen 2.87 s und 4.87 s. Die Warnungen unterschieden sich in ihrer Richtungsspezifität (richtungsspezifisch vs. unspezifisch) und Dringlichkeit (visuelle vs. visuell-auditive Warnung). Richtungsspezifische Warnungen erschienen auf der linken oder rechten Bildschirmseite, je nachdem von welcher Seite der Fußgänger die Straße betrat. Richtungsunspezifische Warnungen wurden an einem zentralen Ort auf dem Bildschirm dargeboten. Eine weitere Probandengruppe erhielt keine Warnung. Zwischen den

---

<sup>7</sup> Dies steht in Einklang mit dem sog. *stimulus-response compatibility effect*, der besagt, dass gerichtete Warnungen eine Lenkradbewegung in Richtung des Warnstimulus erleichtern (Wang, Proctor & Pick, 2003).

Modalitätsbedingungen (visuell vs. visuell-auditiv) fanden sich im Hinblick auf Bremsreaktionszeit (von Erscheinen der Warnung bis Betätigung des Bremspedals) und Blickzuwendungszeit keine Unterschiede. Verglichen mit richtungsunspezifischen Warnungen führten richtungsspezifische Anzeigen sowohl zu einer geringeren Blickzuwendungszeit zum Fußgänger als auch zu einer geringeren Bremsreaktionszeit.

Fricke (2009, Experiment 1) untersuchte ebenfalls die Auswirkungen der Richtungsspezifität auf die Verhaltenswirksamkeit auditiver Warnungen in einer Fahrsimulatorstudie. Die Studienteilnehmer wurden einer von vier Versuchsbedingungen zugewiesen (between-subjects) und mit verschiedenen kritischen Verkehrsszenarien konfrontiert: (1) räumliches „auditory icon“ (d.h. Ton entspricht der Konfliktpart, z.B. Fahrradklingel, falls Konfliktpartner ein Radfahrer ist oder Hupe, falls Konfliktpartner ein PKW ist), (2) räumlicher Ton, (3) ungerichteter Ton und (4) keine Unterstützung. Während in Versuchsbedingung (1) eine konflikt- und richtungsspezifische Warnung dargeboten wurde, erhielten die Probanden in Bedingung (2) ein konfliktunspezifisches und richtungsspezifisches Signal. In Bedingung (3) wurde den Probanden ein konfliktunspezifisches und richtungsunspezifisches Warnsignal angezeigt. Die Situationen bestanden aus Auffahrsituationen (stehendes Fahrzeug auf Fahrstreifen vor dem Probanden), Konflikten mit kreuzenden Radfahrern und plötzlich auf die Straße laufenden Hunden. Aus versuchsökonomischen Gründen wurden die Versuchssituationen in fester Reihenfolge absolviert. Die Warnung wurde jeweils ca. 3-4 Sekunden vor dem Zeitpunkt, zu dem eine Kollision mit dem jeweiligen Verkehrsobjekt stattgefunden hätte, ausgelöst (d.h. Warnzeitpunkt variierte zwischen den Situationen). Alle Warnbedingungen führten zu einer Reduktion der Kollisionsrate. Unterschiede zwischen den Warnbedingungen wurden nicht gefunden. Auch in Bezug auf die Bremsreaktionszeiten und Nützlichkeitsurteile berichtet Fricke (2009) keine systematischen Unterschiede zwischen den Warnbedingungen.

In einer Simulatorstudie untersuchten Zarife, Schmidt, Kenntner-Mabiala, Metz und Krüger (2012) ebenfalls die Effekte von auditiven, richtungsspezifischen gegenüber unspezifischen Warnungen. Innerhalb der Studie absolvierten die Probanden eine Simulatorstrecke mit mehreren kritischen Verkehrssituationen, die sich in der Konfliktrichtung unterschieden. Entweder ereigneten sich die Verkehrskonflikte frontal vor dem Fahrer (z.B. plötzlich bremsendes Vorderfahrzeuge) oder lateral (z.B. kreuzender Verkehrsteilnehmer aus einem seitlichen Straßenarm). Die Probanden wurden entweder unspezifisch („*Master Alert*“) oder richtungsspezifisch gewarnt. Das auditive Warnsignal wurde über Kopfhörer dargeboten, wobei dieses in der richtungsspezifischen Bedingung mit der jeweiligen Konfliktrichtung korrespondierte (frontal, links oder rechts). In der Bedingung mit „*Master Alert*“ wurde der Warnton jeweils frontal dargeboten. Der Zeitpunkt der Warnungen variierte zwischen den beiden Szenarien: In lateralen Szenarien wurden diese 3.9 s vor Erreichen des Konfliktpunkts dargeboten, in frontalen Szenarien 2.5 s. Bei frontalen Szenarien unterschieden sich richtungsspezifische und richtungsunspezifische Warnungen nicht in ihren Auswirkungen auf Blickzuwendungs- und Bremsreaktionszeiten. In lateralen Szenarien zeigten sich hingegen signifikante Unterschiede im Blickverhalten der Fahrer zwischen den Warnbedingungen. Im Gegensatz zum unspezifischen „*Master Alert*“ führten richtungsspezifische Warnungen zu einer früheren Fixation der Konfliktpartner und zu einer stärkeren lateralen Kopfdrehung. Unterschiede in den Bremsreaktionszeiten wurden hingegen nicht beobachtet. Die Probanden schätzten richtungsspezifische und unspezifische Warnungen als vergleichbar hilfreich ein.

In einer Folgestudie untersuchte Zarife (2014) die Auswirkungen von Objekt- und Richtungsspezifität von visuell-auditiven Kollisionswarnungen in urbanen Verkehrssituationen in einem statischen Fahrsimulator. Das Anzeigekonzept dieser Studie bestand aus einer visuellen Anzeige im Kombiinstrument, bei der die Art des Konfliktpartners und die Konfliktrichtung an separaten Displaypositionen angezeigt wurden (siehe Abbildung 6). Die Art des Konfliktpartners wurde über Symbole dargestellt, welche denjenigen von Verkehrszeichen ähnelten. Die Konfliktrichtung wurde durch die farbliche Markierung eines Kreissegments um ein Abbild des Ego-Fahrzeugs übermittelt (dargestellt aus der

Vogelperspektive). Konflikt- und Richtungsspezifität wurden in dieser Studie unabhängig voneinander variiert (2x2-Design, within-subject).

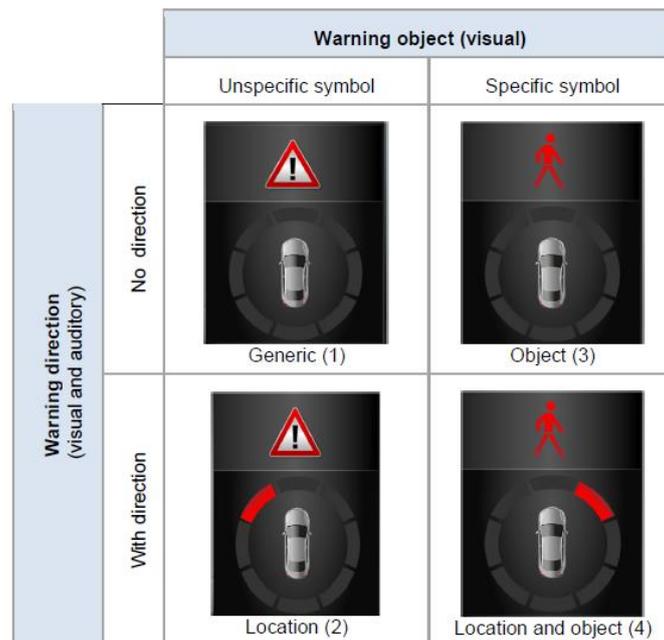


Abbildung 6: Versuchsplan in der Studie von Zarife (2014, S. 110).

Im Falle von richtungsspezifischen Anzeigen (unterer Teil der 4-Felder Tafel in Abbildung 6), wurde auch die auditive Komponente aus der jeweiligen Konfliktrichtung dargeboten. Die Szenarien bestanden aus Konfliktsituationen mit drei verschiedenen Konfliktpartnern (Fußgänger, Radfahrer oder PKW), welche sich dem Konfliktpunkt aus drei verschiedenen Richtungen annäherten (rechts, frontal, links; bei Fußgängern wurde kein frontales Szenario dargeboten). Zusätzlich zu korrekten Alarmen wurden außerdem drei Situationen mit unnötigen Alarmen (Alarm, obwohl sich kein Konflikt entwickelte) implementiert. Die Effekte der Richtungsspezifität der Warnungen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Laterale Szenarien:** In lateralen Szenarien führten richtungsspezifische Warnungen auf globaler Ebene nur zu einer früheren Blickzuwendungszeit auf den Konfliktpartner, wenn diese konfliktunspecific waren. Im Fall von konflikt spezifischen Warnungen fanden sich bei richtungsspezifischen Warnungen spätere Blickzuwendungen als bei richtungsunspecificen Warnungen. In den Konfliktszenarien mit Fußgänger und PKW führten richtungsspezifische Warnungen dazu, dass die Probanden später mit dem Bremsen begannen, was zu kleineren minimalen Abständen zu den Konfliktpartnern führte. Im Konfliktszenario mit dem Radfahrer traf dies nur dann zu, wenn die richtungsspezifische Warnung gleichzeitig konflikt spezifisch war. Direkt nach dem Ereignis wurden richtungsspezifische Warnungen allerdings in allen Szenarien als nützlicher eingeschätzt als richtungsunspecificen Warnungen. Die Konfliktspezifität der Warnungen beeinflusste das Fahrverhalten in geringerem Ausmaß. In den Konflikten mit Fußgängern bremsten die Probanden nach konflikt spezifischen Warnungen früher und beurteilten die Warnungen als nützlicher. Bei Konfliktszenarien mit PKW führten konflikt spezifische Warnungen jedoch zu kleineren minimalen Abständen zum Konfliktpartner.
- Frontale Szenarien:** Verglichen mit den lateralen Szenarien hatte die Spezifität der Warnungen bei frontalen Szenarien einen geringeren Einfluss. In den Konfliktsituationen mit PKW und Radfahrer führten richtungsspezifische Warnungen zu früheren Fixationen der Konfliktpartner, wenn die Warnungen gleichzeitig konflikt spezifisch waren. In der Radfahrer-Situation führten richtungsspezifische Warnungen zu einer stärkeren Bremsreaktion. Auf die Nützlichkeitsurteile hatte die Richtungsspezifität der Warnungen

keinen Einfluss, während konfliktspezifische Warnungen im Szenario mit Radfahrer nützlicher eingeschätzt wurden.

Laut Zarife (2014) sprechen die Ergebnisse aufgrund der früheren Blickzuwendungszeit für die Effektivität richtungsspezifischer-konfliktunspezifischer Warnungen in lateralen Szenarien. Dass diese teilweise zu einem späteren Bremsbeginn und zu geringeren Abständen zu den jeweiligen Konfliktpartnern führten, erklärt Zarife durch die Frühzeitigkeit der Warnung. Da das Zeitintervall, in dem die Probanden reagieren können, ausreichend groß ist, stelle ein späterer Bremsbeginn eine angebrachtere Reaktion auf den Verkehrskonflikt dar und spräche somit für die Darbietung von richtungsspezifischen-konfliktunspezifischen Warnungen.

Bezüglich der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf den Forschungsgegenstand von frühen Fahrerinformationen ist anzumerken, dass sich die vorliegenden Arbeiten in mehreren Punkten voneinander unterscheiden, was eine Übertragbarkeit der Ergebnisse erschwert. Einerseits wurden unterschiedliche Versuchsumgebungen verwendet, welche von Reaktionen auf Videoaufzeichnungen bis hin zu Fahrsimulatoren reichen. Die verwendeten Prüfsituationen sind in manchen Untersuchungen wenig komplex (z.B. Reaktion auf rückwärtigen Verkehr als einzige Fahraufgabe), so dass eine Übertragbarkeit auf komplexere, urbane Situationen nicht ohne weiteres gegeben ist. Weiterhin wurden in den vorliegenden Arbeiten unterschiedliche Warnzeitpunkte verwendet und die Warnungen in unterschiedlichen Kombinationen aus rein visuellen oder visuell-auditiven Anzeigen dargeboten. Auch Sprachwarnungen oder komplexe akustische Warnsignale (Fricke, 2009) wurden untersucht. Weiterhin sind Richtungs- und Konfliktspezifität in manchen Untersuchungen konfundiert, was die Interpretation der Ergebnisse erschwert. Ein Faktor, der die Übertragbarkeit der Ergebnisse weiter einschränkt, besteht darin, dass in den vorliegenden Untersuchungen meist dringliche Warnkonzepte untersucht wurden, wohingegen sich meine Arbeit mit Fahrerinformationen von geringerer Dringlichkeit befasst. Um die Frage der Spezifität von frühzeitigen Fahrerinformationen zu klären, wurde in dieser Arbeit eine Studie im statischen Fahrsimulator durchgeführt (Studie II, siehe Kapitel 5), bei der sowohl Richtungs- als auch Konfliktspezifität der Informationen in mehreren Versuchsszenarien systematisch variiert wurden.

### **3.2.2.3 Darstellung der Entfernung zum betreffenden Konflikt (sog. Abstandsspezifität)**

Neben der Darstellung der Art des Konfliktpartners und der Konfliktrichtung besteht weiterhin die Möglichkeit, die Entfernung zum drohenden Konflikt in der Anzeige darzustellen (Abstandsspezifität). Außerdem ließe sich eine Information über die Wahrscheinlichkeit einer Kollision in die Warnung integrieren (Risikospezifität). Da diese beiden Arten der Spezifität in meiner Arbeit einerseits nicht empirisch untersucht wurden und in den vorhandenen Studien keine urbanen Konfliktszenarien behandelt wurden, werden sie an dieser Stelle lediglich der Vollständigkeit halber ausgeführt.

Bisher liegen zur Abstandsspezifität von Fahrerwarnungen und -informationen nur wenige Studien vor. Die Ergebnissen sind gemischt: Während Werneke und Vollrath (2011) keinen positiven Einfluss der Visualisierung der verbleibenden Zeit bis zum Erreichen der Konfliktsituation finden, berichten Totzke, Naujoks, Mühlbacher und Krüger (2012) von frühzeitigeren Bremsengriffen durch ein abstandsspezifisches Warnkonzept.

In den Arbeiten von Werneke et al. (Werneke & Vollrath, 2011; Werneke et al., 2011) erhielten die Probanden visuelle Informationen über bevorstehende Stau- oder Nebelereignisse auf Autobahnen. Die Probanden wurden auf einem Display entweder über einen sogenannten Kollisionsradar (siehe Kapitel 3.2.2.1) ohne Information über die Gefahrenart („Achtung“, sog. generisches Konzept), über einen Kollisionsradar mit Information über die Gefahrenart („Stau voraus“ bzw. „Nebel voraus“, sog. gemischtes Konzept) oder ohne Kollisionsradar mit Information über die Gefahrenart („Stau voraus“ bzw.

„Nebel voraus“) informiert (sog. spezifisches Konzept) und in einer zweiten Stufe bei weiterer Annäherung an das Ereignis zusätzlich gewarnt („Bremsen“). Der Kollisionsradar wurde benutzt, um den Probanden in der Annäherung an das Ereignis die noch verbleibende Entfernung anzuzeigen. Mehrere Ringe umgaben dabei das abgebildete Fahrzeug. Je näher das Fahrzeug der Gefahr kam, desto mehr Ringe um das Fahrzeug färbten sich ein. Alle Konzepte führten zu einer vergleichbaren Reduktion der Geschwindigkeit nach der Darbietung der Informationsstufe. Es zeigten sich keine Auswirkungen auf das Geschwindigkeitsverhalten durch die abstandsspezifische Anzeige anhand des Kollisionsradars, verglichen mit der Anzeige ohne Kollisionsradar.

Totzke et al. (2011b) warnten Fahrer in einer Fahrsimulatorstudie visuell-auditiv vor Stauenden auf Autobahnen (siehe Abbildung 7) entweder abstandsspezifisch (d.h. unter Angabe und regelmäßiger Aktualisierung der Distanz zum Stauende) oder abstandsunspezifisch (d.h. es erfolgte nur die Angabe, dass ein Stauende vorliegen wird). Die Probanden absolvierten eine Strecke im Fahrsimulator, bei der sie sich an verschiedene Stauenden annäherten, die sich in ihrer Art unterschieden. Entweder war das Stauende schlecht einsehbar („hartes Stauende“) oder gut einsehbar („weiches Stauende“).



Abbildung 7: Abstandsspezifische Warnung (links) und abstandsunspezifische Warnung (rechts, aus Totzke et al., 2011b)

Abstandsspezifische Warnungen gingen mit einer früheren Bremsbereitschaft (Zeitpunkt, zu dem Fahrer ihren Fuß über das Bremspedal bewegen, gemessen mit einem Abstandssensor im Bremspedal), einem früheren Bremszeitpunkt und einer geringeren maximalen Bremsintensität einher, wenn die Stauenden schlecht einsehbar waren („hartes Stauende“). Waren die Stauenden gut einsehbar („weiches Stauende“), hatten weder präzise noch unpräzise Informationen im Vergleich zu einer nicht-assistierten Fahrt einen günstigen Effekt auf das Bremsverhalten (Totzke et al., 2011b).

Das Konzept der Abstandsspezifität wurde in meiner Arbeit nicht in das Informationskonzept integriert und nicht empirisch untersucht. Dies geschah aus zwei Gründen: Erstens liegen hierzu bisher zu wenige Evaluationsstudien vor, um eine Abschätzung der Wirksamkeit dieser Art von Warnungen vorzunehmen. Zweitens wurden abstandsspezifische Warnungen vor allem im Kontext frühzeitiger Warnungen auf Autobahnen oder Landstraßen diskutiert (Naujoks & Totzke, 2014; Totzke et al., 2012; Totzke, Volk, Naujoks & Krüger, 2013; Werneke et al., 2011). In diesen Situationen steht dem Fahrer, verglichen mit den in meiner Arbeit im Vordergrund stehenden urbanen Verkehrskonflikten, mehr Zeit bis zum Erreichen des Konfliktpunkts zur Verfügung. Teilweise wurden die Probanden mehrere Kilometer vor Erreichen des Konfliktpunkts gewarnt, so dass für eine adäquate Bremsreaktion die Abschätzung der verbleibenden Zeit bis zum Konfliktpunkt notwendig war. In diesen Situationen stellen abstandsspezifische Warnungen eine sinnvolle Fahrerunterstützung dar. Es ist fraglich, ob Fahrer auch in zeitkritischen, urbanen Verkehrskonflikten von abstandsspezifischen Anzeigen, die ihnen wenige Sekunden vor dem Erreichen des Konfliktpunkts dargeboten werden, in vergleichbarer Weise profitieren würden.

### 3.2.2.4 Darstellung der Unsicherheit von Informationen (sog. Risikospezifität)

Frühzeitige Fahrerinformationen werden aufgrund der probabilistischen Risikoeinschätzung auf Basis der maschinellen Situationsanalyse mit einer gewissen Unsicherheit behaftet sein (siehe Kapitel 2.4). Aus Sicht der Mensch-Maschine-Interaktion besteht eine mögliche Strategie, die Unsicherheit der Vorhersage zu minimieren, darin, so spät wie möglich zu informieren bzw. zu warnen (siehe Kapitel 3.1). Weiterhin besteht die Möglichkeit, die Darstellung der Unsicherheit in die Information/Warnung mittels sogenannter *Likelihood Alarm Displays* (LAD, Sorkin, Kantowitz & Kantowitz, 1988; Sorkin, 1988) zu integrieren. Die Verwendung binärer Alarmsysteme (kein Alarm vs. Alarm, ohne die Anzeige von Unsicherheitsinformationen) macht es für den Benutzer schwer, korrekte von falschen Alarmen (Präsentation einer Warnung, obwohl keine gefährliche Situation vorliegt) zu unterscheiden (Woods, 1995). Die Variabilität der Zuverlässigkeit verschiedener Informationen wird besser berücksichtigt, wenn sie explizit dargestellt wird (Montgomery & Sorkin, 1996; Montgomery, 1999).

Anwendungen von Likelihood-Alarmsystemen haben sich in vielen Bereichen, in denen probabilistische Warn- oder Informationssysteme eingesetzt werden, als nützlich erwiesen. Beispiele für die erfolgreiche Anwendungen von Likelihood Alarm Displays bei unzuverlässigen Warnsystemen finden sich unter anderem bei Kollisionsalarmen im Fahrzeug (Lee, Hoffman & Hayes, 2004), Warnungen vor glatten Straßenverhältnissen (Gupta, Bisantz & Singh, 2002) oder Warnungen vor simulierten Triebwerksschäden in der Luftfahrt (Bustamante, 2008). Auch für Informationssysteme gibt es erfolgreiche Anwendungen, beispielsweise bei der Identifikation von militärischen Zielen in taktischen Displays (St. John & Manes, 2002) oder bei Navigationsaufgaben in der militärischen Seefahrt (Kirschenbaum & Arruda, 1994).

Eine Anwendung auf die in meiner Arbeit im Mittelpunkt stehenden Fahrerinformationen in urbanen Verkehrssituationen ist bisher noch nicht geschehen. Vor dem Hintergrund der zu erwartenden Prädiktionsunsicherheit der Situationsanalyse (siehe Kapitel 2.4), ist die Anwendung einer solchen Anzeigestrategie auch für frühzeitige Fahrerinformationen denkbar (Seeliger et al., 2014; Weidl & Breuel, 2012; Weidl et al., 2014). Gleichwohl könnten risikospezifische Warnsignale die Komplexität der Anzeigestrategie steigern und sich dadurch negativ auf deren Verständlichkeit auswirken. In meiner Arbeit wird deshalb zunächst die Frage nach dem minimal nötigen Informationszeitfenster sowie dem minimal nötigen Informationsgehalt im Hinblick auf die Art und Richtung des Konflikts untersucht. Ziel ist es, in Bezug auf Zeitpunkt und Spezifität der Information eine optimale Fahrerunterstützung zu gestalten, und gleichzeitig die Unsicherheit der Situationsprädiktion durch eine möglichst niedrige Anforderung an die zugrunde liegende Situationsanalyse zu minimieren.

## 3.3 Informationsmodalität

### 3.3.1 Grundlagenorientierte Arbeiten

Kollisionswarnungen im Fahrzeug enthalten in der Regel eine visuelle Komponente, wobei für dringliche Warnungen eine zusätzliche auditive (in Form eines Warntons; Sprachwarnungen sind für sicherheitskritische Warnungen nicht zu empfehlen, ISO 15006:2004 (E)) oder haptische (bspw. in Form von Sitzvibration) Darbietung empfohlen wird (ISO 15623:2013 (E)). Die Verwendung der zusätzlichen Modalität zielt auf die Steigerung der Wirksamkeit im Vergleich zur rein visuellen Darbietung ab. Eine ausschließliche Warnung durch ein auditives Signal wird nicht empfohlen, da teilweise oder vollständig gehörlosen Personen in vielen Ländern der Führerschein nicht entzogen wird, wohingegen eine ausreichende Sehstärke eine Voraussetzung für das Führen eines Fahrzeugs darstellt.

In allen Studien der vorliegenden Arbeit wird zusätzlich zur visuellen Fahrerinformation ein ungerichteter Ton präsentiert, der keine relevante Information über den Zielreiz (die

Verkehrssituation, auf die reagiert werden soll) beinhaltet. Eine schnellere Reaktion durch die simultane Darbietung aufgabenrelevanter Stimuli (z.B. visuelle Information über die Konfliktrichtung) und aufgabenirrelevanter Stimuli in einer anderen Modalität (sog. „*accessory stimuli*“), wurde bereits vielfach in verschiedenen Settings der Grundlagenforschung gezeigt (Bernstein, Rose & Ashe, 1970; Miller & Van Nes, 2007; Nakano, 2002; R. A. Schmidt, Gielen & Van Den Heuvel, 1984). Bernstein et al. (1970) untersuchten beispielsweise die Auswirkungen auditiver Hinweisreize, die zu verschiedenen Zeitpunkten (0.5 s vs. 5.5 s) vor einem visuellen Zielreiz präsentiert wurden, auf die Reaktionszeiten auf den visuellen Stimulus. Bei kurzem Zeitintervall (0.5 s) zwischen Hinweis- und Zielreiz fanden sich geringere Reaktionszeiten und eine geringere Fehlerrate, als bei längerem Zeitintervall.

In Bezug auf die vorliegende Fragestellung ist insbesondere von Interesse, ob und unter welchen Umständen sich eine Steigerung der Verhaltenswirksamkeit eines visuellen Hinweisreizes durch einen auditiven *accessory stimulus* einstellt. Fernandez-Duque und Posner (1997, Experiment 2) zeigten beispielweise, dass eine Kombination aus visuellem und auditivem Hinweisreiz die Reaktionszeit gegenüber einem rein visuellen Hinweisreiz senken kann. In der Studie sollten Probanden auf Zielreize reagieren, welche an vier verschiedenen Orten (oben, unten, links, rechts von einem Fixationskreuz) erschienen. Die Zeit zwischen Target und Hinweisreiz wurde ebenfalls variiert (105 ms, 405 ms oder 705 ms). Die Probanden erhielten entweder keinen Hinweisreiz, einen visuellen Hinweisreiz oder einen visuell-auditiven Hinweisreiz, ohne dass diese Informationen über den wahrscheinlichen Ort des Targets beinhalteten. Alle Hinweisreize führten zu einer Verringerung der Reaktionszeit gegenüber Durchgängen ohne Cue, wobei auditive Cues zu einer stärkeren Verringerung der Reaktionszeit führten als visuelle Cues. Die Kombination aus visuellem und auditivem Cue führte gegenüber rein auditivem Cue jedoch nicht zu einer stärkeren Verringerung der Reaktionszeit, sondern im Falle einer kurzen Zeit zwischen Cue und Target (105 ms) sogar zu einer Verlängerung der Reaktionszeit gegenüber dem rein auditiven Cue. Gegenüber dem visuellen Cue führten visuell-auditive Cues jedoch konsistent (unabhängig vom Inter-Stimulus-Intervall) zu einer stärkeren Verringerung der Reaktionszeit.

In einem Folgeexperiment (Experiment 3) konnten die Autoren zeigen, dass sich ein Reaktionszeitvorteil durch einen auditiven *accessory stimulus* vorwiegend dann ergibt, wenn dieser bereits vor dem visuellen Hinweisreiz dargeboten wird. Die Probanden mussten ebenfalls auf Zielreize an verschiedenen Darbietungsorten (oben, unten, links, rechts von einem Fixationskreuz) reagieren und erhielten entweder einen ungerichteten auditiven Hinweisreiz (1), einen gerichteten visuellen Hinweisreiz, der am Ort des Zielreizes erschien (exogener Cue; 2), einen gleichzeitig mit dem visuellen Hinweisreiz dargebotenen ungerichteten auditiven Hinweisreiz (3), einen ungerichteten auditiven Hinweisreiz 400 ms vor dem visuellen Hinweisreiz (4), oder keinen Hinweisreiz (5). Zwischen visuellem Cue und Zielreiz lagen entweder 100 ms oder 400 ms. Die Kombination aus visuellem und auditivem Cue führte generell zu den geringsten Reaktionszeiten (verglichen mit visuellem und auditivem Cue alleine). Unter Einbezug der Variation der Zeit zwischen visuellem Hinweisreiz und Zielreiz fanden sich die kürzesten Reaktionszeiten, wenn der auditive Cue dem visuellen *voranging* und die Zeitspanne zwischen visuellem Cue und Target kurz war (100 ms). Bei längerer Zeitspanne zwischen visuellem Cue und Target (400 ms) fanden sich keine Reaktionszeitvorteile durch die Präsentation des auditiven Cues vor dem visuellen Cue.

Basierend auf diesen Ergebnissen kann davon ausgegangen werden, dass ein auditiver *accessory stimulus* (z.B. ungerichteter Warnton) die Wirksamkeit eines visuellen Hinweisreizes (z.B. Information über drohenden Verkehrskonflikt) steigert. Kiesel und Miller (2007) führen mehrere mögliche Gründe für die Wirksamkeit von *accessory stimuli* an: (1) Änderung der Wahrnehmungsprozesse bei der Dekodierung des visuellen Reizes (z.B. Änderung der wahrgenommenen Reizintensität des visuellen Reizes), (2) Erleichterung der Reaktionsauswahl (Hackley & Valle-Inclán, 2003; Posner, Nissen & Klein, 1976) und (3) Erhöhung der Reaktionsintensität (Miller, Franz & Ulrich, 1999).

Um zu untersuchen, ob die Wirkung von *accessory stimuli* auf die Änderung von Wahrnehmungsprozessen (1) oder von Prozessen der Reaktionsselektion und -ausführung (2+3) abhängen, führten Kiesel und Miller (2007) zwei Studien durch. In der ersten Studie wurde untersucht, inwieweit *accessory stimuli* die Reaktionsauswahl beeinflussen. Hierzu wurden den Studienteilnehmern Stimuli entweder auf einer Seite (links oder rechts, *single-target condition*) oder auf beiden Seiten eines Fixationskreuzes (*redundant target condition*) präsentiert. Die Probanden sollten auf die Präsentation eines Reizes (unabhängig vom Reizort) mit einem Tastendruck reagieren (*go-trial*). In Durchgängen ohne Zielreiz sollten die Probanden keine Reaktion zeigen (*no-go-trial*). Sowohl in *go-* als auch in *no-go-trials* konnte ein irrelevanter auditiver *accessory stimulus* präsentiert werden. Dabei wurde die Kontingenz zwischen *accessory stimulus* und Reaktionsart variiert. Für eine Probandengruppe wurde der *accessory stimulus* in 75% aller *go-trials* präsentiert („Ton häufig mit *go*“) und in nur 25% der *no-go-trials*. Für eine andere Gruppe war die Kontingenz der *accessory stimuli* mit der Reaktionsart (*go/no-go*) umgekehrt („Ton häufig mit *no-go*“). Falls *accessory stimuli* die Reaktionsauswahl beeinflussen, wurde erwartet, dass sich eine Verkürzung der Reaktionszeiten in Abhängigkeit von der Kontingenzbedingung zeigen würde. Die Probanden reagierten tatsächlich schneller und stärker mit als ohne Ton, wobei die Reaktionszeitgewinne in der Bedingung „Ton häufig mit *go*“ größer ausfielen. Die Ergebnisse unterstützen somit die Hypothese, dass die Wirksamkeit von *accessory stimuli* zumindest teilweise auf eine Erleichterung der Reaktionsprozesse (Reaktionsselektion/-intensität) zurückzuführen ist. In einer zweiten Studie wurde dieselbe Versuchsanordnung benutzt, allerdings wurden hierbei Kontingenzen zum Zielreiz hergestellt (*accessory stimuli* treten entweder wahrscheinlicher mit *single-target* oder *redundant target* auf). Die Verteilung der *accessory stimuli* auf *go-* und *no-go-trials* (Kontingenz mit Reaktionsart) wurde konstant gehalten. Auch in diesem Experiment reagierten die Probanden schneller und stärker, wenn ein zusätzlicher Ton dargeboten wurde. Allerdings zeigten sich keine Effekte der Kontingenz-Bedingung. Die Ergebnisse der zweiten Studie sprechen somit gegen die Hypothese, dass *accessory stimuli* Wahrnehmungsprozesse bei der Entdeckung der Zielreize erleichtern, aber für die Annahme, dass sie Prozesse der Reaktionsselektion und -ausführung unterstützen.

### 3.3.2 Angewandte Arbeiten

Zusätzlich zu der Frage, zu welchem **Zeitpunkt** vor einem drohenden Konflikt Informationen darüber an den Fahrer zu übermitteln sind (siehe Kapitel 3.1), und der Frage nach der **Spezifität** der Fahrerinformationen (siehe Kapitel 3.2), stellt sich die Frage, in welcher **Modalität** der Fahrer informiert werden sollte. Die Wahl der geeigneten Modalität für Informationen und Warnungen des Fahrers wurde in diversen Richtlinien zur Gestaltung von Warnsignalen im Fahrzeug diskutiert (bspw. Dingus et al., 1998; Rhede et al., 2011; International Harmonized Research Activities (IHRA) working group on Intelligent Transport Systems (ITS), 2008; Green et al., 1993; Campbell et al., 1997; COMSIS Corporation, 1996) und in empirischen Arbeiten untersucht (z.B. Adell, Várhelyi, Alonso & Plaza, 2008; Cao et al., 2010; Nees & Walker, 2011; Van Erp & Van Veen, 2004). In Bezug auf dringliche Kollisionswarnungen (*collision warning*) bestehen mittlerweile klare Standards, die eine multimodale Anzeigestrategie fordern. Eine visuelle Komponente ist entweder mit einer auditiven (in Form eines Warntons) oder haptischen (bspw. in Form von Sitzvibration) Komponente zu kombinieren (ISO 15623:2013 (E)). Falls das Warnkonzept eine Vorwarnung vorsieht (*preliminary collision warning*), kann hierfür auch eine rein visuelle Warnung verwendet werden, wobei auch in diesem Fall ein zusätzlicher, unaufdringlicher Ton von informierendem Charakter empfohlen wird (ISO 15623:2013 (E)).

Es wird davon ausgegangen, dass redundante Anzeigestrategien (d.h. parallele Kodierung der Warn- oder Informationssignale in mehreren Modalitäten) bei der Unterstützung der Fahrerreaktion effektiver sind als eine unimodale Kodierung (Ho, Reed & Spence, 2007). Die zusätzliche Nutzung der auditiven Komponenten verfolgt hierbei mehrere Ziele. Einerseits kann die Verhaltenswirksamkeit der Fahrerinformationen im Sinne eines *accessory stimulus* (siehe vorangegangener Abschnitt) durch eine Erleichterung der Reaktionsauswahl und -

umsetzung gesteigert werden (Kiesel & Miller, 2007). Andererseits hängt die Verhaltenswirksamkeit von visuellen Anzeigeelementen beim Fahren vermutlich stark davon ab, ob die Anzeige vom Fahrer bemerkt wird, was in Anbetracht der Größe des vom Fahrer zu überwachenden visuellen Felds nicht zwangsläufig gegeben sein muss. Es wird deshalb davon ausgegangen, dass die Verwendung akustischer Signale die Wirksamkeit von Fahrerwarnungen und -informationen steigern kann, da diese zu einer schnelleren Blickzuwendung zur und Verarbeitung der visuellen Anzeige führen (Campbell, Richard, Brown & McCallum, 2007).

Politis, Brewster und Pollick (2013) untersuchten Kollisionswarnungen von unterschiedlicher Modalität. Als bei einer simulierten Folgefahrt ein Vorderfahrzeug bremste, erhielten die Probanden in der Hälfte der Bremssituationen gleichzeitig mit dem Bremsbeginn des Vorderfahrzeugs eine Warnung. In der anderen Hälfte blieb die Warnung aus. Zusätzlich wurden falsche Alarmer in der gleichen Häufigkeit wie korrekte Alarmer dargeboten. Die Warnungen wurden entweder visuell (visueller Stimulus, der direkt über dem simulierten Vorderfahrzeug angezeigt wird), auditiv (ungerichteter Warnton) oder haptisch (Vibrationsgurt) sowie in allen Kombinationsmöglichkeiten der Modalitäten (visuell-auditiv, visuell-haptisch, auditiv-haptisch und visuell-auditiv-haptisch) dargeboten. Die Autoren berichten, dass die Reaktionszeiten auf multimodale Warnungen in allen Kombinationen niedriger ausfielen als auf unimodale Warnungen.

Kramer et al. (2007) untersuchten ebenfalls die Effektivität von uni- und multimodalen Kollisionswarnungen (auditiv, visuell, visuell-auditiv, visuell-haptisch oder keine Warnung; within-subject) für frontale und laterale Konfliktszenarien im statischen Fahrsimulator. Die frontale Kollisionssituation bestand aus einem plötzlich auftauchenden stationären Fahrzeug. Laterale Kollisionssituationen wurden erzeugt, indem die Probanden an mehreren Stellen zu einem Fahrstreifenwechsel aufgefordert wurden, obwohl sich ein Fahrzeug im toten Winkel befand, das zu Beginn des Fahrstreifenwechsels plötzlich im Spiegel auftauchte. Visuelle, auditive und haptische Warnsignale wurden räumlich dargeboten (visuell: Aktivierung frontaler oder lateraler Segmente einer LED-Leiste an der Windschutzscheibe; auditiv: frontale oder laterale Darbietung eines Warntons; haptisch: ungerichtete oder laterale Sitzvibration). Die Warnungen wurden jeweils kurz vor einer drohenden Kollision dargeboten (frontales Kollisionsszenario: TTC = 2.12 s). Nur visuell-auditive Warnungen senkten die Fahrerreaktionszeiten beim frontalen Kollisionsszenario gegenüber nicht-assistierten Fahrten und gingen mit einer Verringerung der Kollisionsrate einher. Beim lateralen Kollisionsszenario senkten visuell-auditive und rein visuelle Warnungen die Reaktionszeiten gegenüber der nicht-assistierten Fahrt, jedoch führten nur visuell-auditive Warnungen auch zu einer Verringerung der Kollisionsrate. In einer Folgestudie verglichen die Autoren in derselben Versuchsumgebung visuelle und visuell-auditive Warnungen und eine Bedingung ohne Warnung (within-subject). Allerdings waren die Probanden in dieser Studie dazu aufgefordert, eine visuelle Nebenaufgabe während des Fahrens zu bearbeiten, die eine Blickabwendung von der Straße erforderte (lautes Vorlesen von zufälligen 10-Ziffern-Folgen, die alle ein bis vier Sekunden nach der vorangegangenen Ziffernfolge auf einem Display im Fahrzeug präsentiert wurden). Auch unter Ablenkungsbedingungen zeigte sich eine Verringerung der Reaktionszeit und der Kollisionsrate bei beiden Kollisionsereignissen nur bei visuell-auditiver Darbietung.

Aus den vorgestellten Arbeiten kann abgeleitet werden, dass visuell-auditive Anzeigen bei dringlichen Kollisionswarnungen eine größere Wirksamkeit zeigen als rein visuelle Anzeigen. An dieser Stelle ist jedoch anzumerken, dass in Bezug auf frühzeitige Fahrerinformationen, die in meiner Arbeit im Mittelpunkt stehen, möglicherweise trotzdem eine visuelle gegenüber einer visuell-auditiven Anzeigestrategie zu bevorzugen ist. Trotz einer höheren anzunehmenden Verhaltenswirksamkeit visuell-auditiver gegenüber rein visueller Fahrerwarnungen muss beachtet werden, dass gerade bei dringlichen (auditiven) Anzeigen ein nachteiliger Effekt auf Wirksamkeit und Akzeptanz der Fahrerunterstützung durch falsche Alarmer zu erwarten ist (Dingus et al., 1998; Bliss & Acton, 2003). Weiterhin liegen die Reaktionszeitunterschiede zwischen visueller und visuell-auditiver Warnung bei maximal ca.

400 ms (Kramer et al., 2007). Dieser bei dringlichen Fahrerwarnungen entscheidende Reaktionszeitunterschied ist hinsichtlich frühzeitiger Fahrerinformationen möglicherweise von geringerer Bedeutung. Durch kooperative Kommunikationstechnologie steht dem Fahrer wahrscheinlich ein bedeutend größeres Zeitfenster zur Reaktion zur Verfügung. Dadurch wäre ein Reaktionszeitgewinn durch eine zusätzliche auditive Komponente weniger bedeutsam.

Eine Studie, die den letztgenannten Punkt illustriert, wurde von Scott und Gray (2008) durchgeführt. Die Probanden wurden während einer Folgefahrt im statischen Fahrsimulator durch eine Frontalkollisionswarnung unterstützt, welche entweder visuell (LED-Leiste), auditiv (Warnton) oder haptisch (Vibrationsgurt) dargeboten wurde. Die Warnung wurde durch ein Bremsmanöver des Vorderfahrzeugs ausgelöst, wenn der Proband noch drei bzw. fünf Sekunden zur Vermeidung einer Kollision hatte. Zusätzlich absolvierten die Probanden die Situation ohne jegliche Unterstützung (within-subject). Bei später Warnung (3 s) führte keine der Warnungen zu einer Verringerung der Reaktionszeit auf das bremsende Vorderfahrzeug gegenüber der nicht-assistierten Fahrt. Bei früher Warnung (5 s) führten jedoch alle Warnungen zu einer Verkürzung der Reaktionszeiten. Während auditive und haptische sowie auditive und visuelle Warnungen bei frühem Warnzeitpunkt zu vergleichbaren Reaktionszeiten führten, reagierten die Probanden bei haptischen Warnungen schneller als bei visuellen Warnungen.

Vor dem Hintergrund der Studie von Scott und Gray (2008) und den anzunehmenden negativen Folgen fälschlicher Aktivierung der Fahrerunterstützung (siehe Kapitel 3.4) ist es ungeklärt, ob die von anderen Autoren gefundenen Reaktionszeitgewinne durch visuell-auditive Informationen gegenüber rein visuellen Informationen (Kramer et al., 2007) tatsächlich einen bedeutsamen Einfluss auf die Wirksamkeit der Fahrerunterstützung haben. Aus diesem Grund wird die Frage der Bedeutung der Modalität (visuell oder visuell-auditiv) bei frühzeitigen Fahrerinformationen innerhalb dieser Arbeit in einer empirischen Studie aufgegriffen werden (Studie III).

### 3.4 Systemgrenzen und -fehler

Grundlage für die Ausgabe von Informations- oder Warnsignalen an den Fahrer stellt die Situationsanalyse dar (siehe Kapitel 2.4 bzw. Weidl & Breuel, 2012; Weidl et al., 2014). Aufgrund der probabilistischen Natur der Situationsprognose muss mit einer gewissen Unzuverlässigkeit von Fahrerinformationen bzw. Fahrerwarnungen gerechnet werden (siehe Abschnitt 2.4). Es werden hierbei zwei klassische Arten der Fehl-/Falsch-Information bzw. -warnung unterschieden (D. M. Green & Swets, 1966):

- (1) **Falscher Alarm** (engl. „false alarms“): Information/Warnung über eine drohende Konfliktsituation, obwohl keine Gefahr existiert oder sich die angezeigte Situation wieder entschärft, weswegen kein Konflikt zwischen den betreffenden Verkehrsteilnehmern entsteht. Es konnte wiederholt gezeigt werden, dass gehäufte falsche Alarme das Vertrauen in Warnungen vermindern und zu einer längeren Reaktionszeit oder einer schwächeren Reaktion bei korrekten Warnungen (im Gegensatz zu fehlerfreien Warnsystemen) führen (Bliss & Acton, 2003; Cotté, Meyer & Coughlin, 2001; Lees & Lee, 2007; Yamada & Kuchar, 2006).
- (2) **Verpasster Alarm** (engl. „miss“): Information/Warnung über eine drohende Konfliktsituation, die nicht ausgelöst wird, obwohl der Fahrer auf eine kritische Situation trifft. Verpasste Alarme mindern ebenfalls das Vertrauen in ein Warnsystem und können schlimmstenfalls zu einer verlängerten Reaktionszeit gegenüber dem nicht-assistierten Fahren führen, wenn vor einem kritischen Ereignis nicht gewarnt wird, obwohl das Warnsystem aktiv ist (Mahr, Cao, Theune, Schwartz & Müller, 2010).

In diesem Kapitel werden empirische Arbeiten, welche sich mit der Zuverlässigkeit von Hinweisreizen (grundlagenorientiert) und Warnsystemen (anwendungsorientiert) beschäftigt haben, vorgestellt. Dabei wird einerseits auf die zu erwartenden Folgen der

Unzuverlässigkeit von Fahrerinformationen eingegangen. Andererseits wird vorgeschlagen, die oben genannte klassische Einteilung von Systemfehlern in falsche und verpasste Alarme in Anbetracht der Komplexität von Fahrerinformationen zu erweitern.

### 3.4.1 Grundlagenorientierte Arbeiten

Durch frühzeitige Fahrerinformationen sollen Fahrer in dieser Arbeit dabei unterstützt werden, ihre Aufmerksamkeit in Verkehrskonfliktszenarien auf einen bestimmten Ort in der Verkehrsumgebung zu richten, die Kollisionsgefahr mit einem anderen Verkehrsteilnehmer richtig einzuschätzen und – wenn nötig – rechtzeitig in die Fahrzeugführung einzugreifen. Die Ausrichtung der visuellen Aufmerksamkeit auf bestimmte Orte wurde beispielsweise innerhalb des *spatial cueing* Paradigmas untersucht (Posner, 1980; Posner et al., 1980). Wie in Kapitel 3.2.1 dargestellt, wurde dabei eine Reaktionszeitverkürzung auf Zielreize, die an verschiedenen Ort erscheinen können, durch räumliche und objektspezifische Hinweisreize erreicht.

Entscheidend für die Wirksamkeit dieser Hinweisreize ist deren Validität (d.h. ob der Zielreiz tatsächlich an der jeweiligen Stelle erscheint, oder an einem anderen Präsentationsort). In einem klassischen Experiment von Posner et al. (1978) mussten Probanden einen Punkt fixieren und auf Reize links oder rechts von diesem Punkt reagieren, ohne den Blick von dem Fixationspunkt abzuwenden. Die Probanden erhielten entweder einen Hinweisreiz, der die Stelle des Zielreizes anzeigte, oder nicht. In 80% der Durchgänge wurde der Zielreiz an der durch den Hinweisreiz angekündigten Stelle angezeigt, in 20% auf der anderen Seite. Während sich eine Verringerung der Reaktionszeit bei validem Cue gegenüber Durchgängen ohne Cue zeigte, erhöhte sich die Reaktionszeit bei invalidem Cue. Vossel, Thiel und Finke (2006) benutzen eine ähnliche Versuchsanordnung. Die Probanden sollten ihren Blick auf einen Fixationspunkt richten und auf Zielreize reagieren, die links oder rechts vom Fixationspunkt dargeboten wurden. Zwei visuelle Hinweisreize, die sich in ihrer Validität unterschieden, wurden vor der Präsentation des Zielreizes dargeboten. Je nach Hinweisreiz erschien der Zielreiz zu 60% oder 90% an der durch den Hinweisreiz angezeigten Stelle. Der Unterschied in der Reaktionszeit auf valide und invalide Durchgänge fiel in der Bedingung mit höherer Validität größer aus.

Kingstone (1992) berichtet mehrere Studien, in denen Hinweisreize über Ort und Art des Zielreizes gegeben wurden (siehe Abschnitt 3.2.1 für eine ausführliche Darstellung). Sowohl Richtungs- als auch Form-Cue reduzierten die Reaktionszeiten auf die Zielreize. Die Probanden hatten zu entscheiden, ob ein Buchstabe („A“ oder „V“), welcher rechts oder links von einem Fixationskreuz erschien, horizontal oder vertikal orientiert ist. Vor dem Zielreiz wurde ein Hinweisreiz präsentiert, der eine Information über Art und Ort des Zielreizes beinhaltete. In einer der von Kingstone durchgeführten Studien wurde in einem between-within Design die Validität der Cues variiert: Bei der einen Hälfte der Probanden wurde die Validität der Form-Cues variiert (70% vs. 90%, within-subject), während bei der anderen Hälfte die Validität der Richtungs-Cues variiert wurde (70% vs. 90%, within-subject). In beiden Experimentalgruppen blieb die Validität des jeweils anderen Cues (Form/Richtung) konstant (80%). Eine Reduktion der Validität führte bei beiden Cues zu einer verringerten Reaktionszeitdifferenz zwischen validem und invalidem Cue. Reaktionszeitvorteile für valide gegenüber invaliden Cues blieben weiterhin erhalten (d.h. die Probanden profitierten auch von Hinweisreizen, die nur zu 70% valide waren).

Die aufgeführten Studien illustrieren einen Aspekt, der bei der Gestaltung frühzeitiger Fahrerinformationen, wie auch bei Warnungen im Allgemeinen, nicht vernachlässigt werden sollte: Durch Lenkung der Aufmerksamkeit an einen bestimmten Punkt in der Verkehrsumgebung oder auf ein bestimmtes Verkehrsobjekt wird die Überwachung anderer Orte möglicherweise vernachlässigt. Im Fall von *fehlerhaften Fahrerinformationen* (bspw. wenn Konfliktrichtung oder Konfliktpartner fehlerhaft angezeigt werden) kann sich dies negativ auf die Fahrerreaktion auswirken.

Eine weitere Folge von Unsicherheit der Situationsprädiktion bei frühzeitigen Fahrerinformationen besteht darin, dass Informationen über einen drohenden Konflikt an den Fahrer weitergegeben werden (bspw. wenn ein Konflikt mit einem kreuzenden Radfahrer an einer Kreuzung prädiziert wird), obwohl letztlich kein Verkehrskonflikt eintritt (bspw. weil der Radfahrer seine Richtung ändert oder anhält). Die Kontingenz zwischen Fahrerinformation und geforderter Reaktion (Informationspräsentation: Bremsen; keine Information: Weiterfahren) wird dadurch gemindert. Kiesel und Miller (2007) variierten beispielsweise die Kontingenz zwischen einem *accessory stimulus* und der Reaktionsart in einer *go/no-go* Aufgabe (siehe Kapitel 3.2.1 für eine ausführliche Darstellung der Studie): Für eine Probandengruppe wurde der *accessory stimulus* in 75% aller *go-trials* präsentiert („Ton häufig mit *go*“) und nur in 25% der *no-go-trials*. Für die andere Gruppe war die Kontingenz der *accessory stimuli* mit der Reaktionsart (*go/no-go*) umgekehrt („Ton häufig mit *no-go*“). Zwar fand sich auch dann eine Reaktionszeitverkürzung, wenn der *accessory stimulus* häufiger in *no-go*-Durchgängen präsentiert wurde, diese fiel jedoch geringer aus, als bei häufigerer Präsentation in *go*-Durchgängen.

Im nächsten Abschnitt werden Studien vorgestellt, die Warnsysteme in verschiedenen angewandten Settings untersucht haben. Ein konsistenter Befund ist hierbei, dass Warnsysteme, bei denen die Warnausgabe in geringerem Umfang mit einer tatsächlich geforderten Reaktion einhergehen – ähnlich wie in der Studie von Kiesel und Miller (2007) – zu einer Verringerung der Wirksamkeit des Warnsystems führen. Zurückzuführen ist dieser Befund insbesondere auf eine längere Reaktionszeit oder eine verminderte Reaktionsintensität.

### 3.4.2 Angewandte Arbeiten

Die Unzuverlässigkeit von Warnsystemen kann sich grundsätzlich auf zwei Arten auf das Fahrverhalten auswirken (Meyer, 2004). *Compliance* beschreibt die Verhaltenskonsequenzen, wenn eine Warnung *präsentiert* wurde, z.B. Schnelligkeit und Stärke von Bremsenengriff und Geschwindigkeitsreduktion infolge der Warnung. *Reliance* beschreibt die Verhaltenskonsequenzen, wenn die Warnung *ausbleibt*, z.B. Ausbleiben eines Bremsenengriffs und Beibehaltung der Geschwindigkeit, wenn keine Warnung gegeben wurde (d.h. dass Warnsystem ist zwar aktiv, gibt aber keinen Alarm aus).

Die oben genannte Unterscheidung ist deswegen von Interesse, da falsche und verpasste Alarme typischerweise mit unterschiedlichen Auswirkungen auf *compliance* und *reliance* einhergehen (Meyer, 2004). Während falsche Alarme zu einer Minderung der *compliance* führen (z.B. Erhöhung der Reaktionszeit oder Verminderung der Reaktionsstärke auf Warnausgaben bei einem System mit häufigen falschen Alarmen; Breznitz, 1983; Getty, Swets, Pickett & Gonthier, 1995; Sorkin, 1988), beeinflussen verpasste Alarme eher die *reliance* (z.B. vorsichtigeres Fahren, wenn Warnsystem bei Konfliktsituationen oft keine Warnung ausgibt; Cotté et al., 2001; Yamada & Kuchar, 2006).

Bliss und Acton (2003) zeigten beispielsweise in einer Fahrsimulatorstudie, dass die *compliance* gegenüber einem Warnsystem mit steigender Falschalarmrate abnimmt. Der Anteil an Probanden, welche eine Reaktion auf Fahrerwarnungen vor sich schnell annäherndem rückwärtigen Verkehr zeigte, nahm mit steigender Rate an falschen Alarmen ab, während die Kollisionsrate zunahm (siehe Abschnitt 3.2.2.2 für eine ausführliche Darstellung der Studie).

Auch in der Studie von Cummings et al. (2007, siehe ebenfalls Abschnitt 3.2.2.2), welche die Wirksamkeit von verschiedenen konfliktspezifischen Warnsignalen sowie einer unspezifischen Warnung in mehreren Konfliktszenarien miteinander verglich, wurde die Zuverlässigkeit der Warnungen variiert (25% vs. 75% falsche Alarme). Die Steigerung der Rate an falschen Alarmen führte zu einem Anstieg der Reaktionszeit, wenn auch nur in einer von vier untersuchten Situationen. Der Effekt zeigte sich, wie in der Studie von Bliss und Acton (2003) nur bei drohenden Kollisionen vor sich schnell annäherndem, rückwärtigen Verkehr, nicht aber bei drohenden Frontalkollisionen oder Spurabkommen. Der Effekt

falscher Alarme auf die Reaktionszeit war unabhängig von der Konfliktspezifität der Warnung.

Yamada und Kuchar (2006) untersuchten zusätzlich zu den Auswirkungen falscher Alarme die Auswirkungen von verpassten Alarmen eines Fahrerwarnsystems. In der Fahrsimulatorstudie mussten die Probanden insgesamt acht drohende Kollisionen mit Fußgängern während einer Nachtfahrt vermeiden. Die Fußgänger erschienen plötzlich am Straßenrand und kreuzten knapp vor dem Probandenfahrzeug unvermittelt die Fahrbahn, so dass eine Kollisionswarnung ausgegeben wurde. Die Probanden absolvierten die Fahrt entweder ohne Warnsystem oder mit einem Warnsystem von unterschiedlicher Zuverlässigkeit (within-design):

- Variante A: ohne Warnsystem
- Variante B: 50% Misses (keine falschen Alarme) oder
- Variante C: 25% Misses (keine falschen Alarme) oder
- Variante D: 25% Misses *und* 50% falsche Alarme

Durch die verschiedenen Arten der Unzuverlässigkeit zeigten sich unterschiedliche Effekte auf das Fahrverhalten. Ein Anstieg der Rate an verpassten Alarmen führte zu einer Verringerung der Fahrtgeschwindigkeit in Situationen, in denen keine Warnungen dargeboten wurden (verminderte *reliance*). Ein Anstieg der Rate an falschen Alarmen bedingte einen Anstieg der Reaktionszeiten auf Warnungen (verminderte *compliance*).

Cotté, Meyer und Coughlin (2001) untersuchten in ähnlicher Weise die Auswirkungen von falschen und verpassten Alarmen auf das Fahrverhalten mit einem Warnsystem. Die Studienteilnehmer absolvierten eine Strecke im Fahrsimulator mit der Instruktion, eine Richtgeschwindigkeit von 50 Meilen pro Stunde bestmöglich einzuhalten (d.h. insbesondere nicht langsamer zu fahren) und trotzdem Kollisionen mit plötzlich auftauchenden Verkehrsobjekten zu vermeiden. Die Warnung vor drohenden Kollisionen bestand in einer Sprachwarnung („*Brake, brake, brake, brake*“). Die Probanden wurden einer von zwei Auslegungen des Warnsystems zugewiesen: Das System hatte entweder mehr falsche Alarme (false alarms: 41%, misses: 10%) oder mehr verpasste Alarme (false alarms: 10%, misses: 41%). Außerdem wurde variiert, ob bei der Ausgabe von falschen Alarmen in der jeweiligen Situation eine Ursache für den falschen Alarm existierte (z.B. parkendes Fahrzeug am Straßenrand). Zum einen führte das System mit häufigeren falschen Alarmen und seltenen verpassten Alarmen zu einer geringeren Geschwindigkeitsreduktion in den 45 Metern nach der Warnausgabe (Minderung der *compliance*). Außerdem wählten die Probanden dieser Bedingung eine höhere Geschwindigkeit in Streckenteilen, in denen keine Warnung gegeben wurde (Erhöhung der *reliance*). Die Anwesenheit von Verkehrsobjekten bei falschen Alarmen hatte keinen Einfluss auf das Geschwindigkeitsverhalten. Ältere, nicht aber jüngere Probanden, bewerteten das Warnsystem als weniger fehlerbehaftet, wenn Gründe für die falschen Alarme ersichtlich waren.

Aus den angeführten Studien lässt sich folgern, dass falsche Alarme möglicherweise eine nachteiligere Wirkung auf das Fahrverhalten haben als verpasste Alarme. Falsche Alarme können (1.) zu einer Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit führen, solange kein Alarm angezeigt wird (Erhöhung der *reliance*) und (2.) bei Warnausgabe zu einer langsameren und weniger starken Bremsreaktion führen (Minderung der *compliance*). Das Phänomen der Wirksamkeitseinschränkung von Warnsystemen durch falsche Alarme wurde in der Literatur als „*cry wolf effect*“ (Breznitz, 1983) beschrieben und in verschiedenen Anwendungskontexten gezeigt, wie beispielsweise in der Prozesskontrolle bei Industrieanlagen (Kragt & Bonten, 1983; Lee & Moray, 1992), Alarmsystemen in der Luftfahrt (Pritchett, 2001) oder der Medizintechnik (Kestin, Miller & Lockhart, 1988; Lawless, 1994; Meredith & Edworthy, 1995).

Aus diesen Gründen ist es für die Evaluation der Wirksamkeit frühzeitiger Fahrereinformationen von entscheidender Bedeutung, nicht nur auf den Nutzenfall (d.h.

Informationssystem arbeitet fehlerfrei) zu fokussieren, sondern die Auswirkungen der Unzuverlässigkeit der Situationsanalyse und -prädiktion mit einzubeziehen. Ein entscheidender Faktor dafür, ob sich im Kontext frühzeitiger Fahrerinformationen ebenfalls ein *cry wolf effect* einstellt, ist möglicherweise, ob die Fahrer die Ursache für die Ausgabe falscher Alarme nachvollziehen können (Cotté et al., 2001; Lee & See, 2004; Lees & Lee, 2007). Laut Lees und Lee (2007) hängen *compliance* und *reliance* vom Vertrauen (*trust*) auf das jeweilige Warnsystem ab. Vertrauen wird hierbei als Einstellung gegenüber dem Warnsystem definiert und beinhaltet die Evaluation, ob dieses den Fahrer in potentiellen Kollisionssituationen bei der Identifikation von Gefahren unterstützt. Das Vertrauen hat hierbei drei Dimensionen, *performance*, *process* und *purpose* (Lee & See, 2004; Lees & Lee, 2007). *Performance* bezieht sich darauf, ob das Warnsystem bei der Vermeidung von Kollisionen nützlich ist. *Process* (auch *predictability* genannt) beschreibt die Funktionsweise des Warnsystems, d.h. ob vom Fahrer nachvollzogen werden kann, wie das Warnsystem die Verkehrsumgebung analysiert und Warnausgaben generiert. *Purpose* (auch *intent* genannt) beschreibt die Intentionen des Herstellers bei der Entwicklung des Warnsystems, insbesondere für welche Situationen der Hersteller eine Warnung intendiert hat.

Vertrauen kann auf Vorannahmen über das Warnsystem und auf Erfahrungen bei der Nutzung des Warnsystems basieren (Lee & See, 2004; Masalonis & Parasuraman, 1999). Die von Lees und Lee (2007) eingeführten Vertrauensdimensionen legen nahe, dass eine rein technische Unterscheidung in „korrekte Ausgabe“ (true positive<sup>8</sup>) und „falsche Ausgabe“ (false positive<sup>9</sup>) wahrscheinlich nicht ausreichend ist, um die mit (aus technischer Sicht) Falschalarmen einhergehenden Auswirkungen auf das Vertrauen und die resultierende *compliance*-Änderung zu erklären und vorherzusagen. Vielmehr existiert vermutlich ein Kontinuum mit den Polen „korrekter Alarm“ (kritische Situation trifft ein) und „falscher Alarm“ (grundlose Warnausgabe), zwischen denen ein Bereich von „unnötigen Warnungen“ liegt. Bei unnötigen Alarmen wird durch das Assistenzsystem eine potentiell kritische Situation erkannt, die sich aber im weiteren Situationsverlauf entschärft (bspw. Warnung vor überschreitendem Fußgänger, der beim Betreten der Straße doch anhält, siehe Tabelle 1). Nach Lees und Lee (2007) lässt sich folgende Unterscheidung treffen:

- *Korrekte Alarme* werden von den Fahrern als nützlich bei der Vermeidung von Kollisionen erachtet, da sie in kritischen Situationen dargeboten werden, die der Fahrer sonst nur schwer oder gar nicht vermeiden könnte. Bei korrekten Alarmen können die situativen Bedingungen, die zu einer Warnung führen, vom Fahrer verstanden werden, was dazu führt, dass die Warnungen aus seiner Perspektive nachvollziehbar sind. Die Darbietung der Warnungen steht aus Fahrersicht im Einklang mit dem intendierten Zweck des Warnsystems.
- *Unnötige Alarme* werden von den Fahrern nicht als nützlich bewertet, da sie in Situationen dargeboten werden, die zwar durch die maschinelle Situationsanalyse, nicht aber vom Fahrer selbst als gefährlich erachtet werden. Allerdings können bei unnötigen Warnungen die Bedingungen, die zu einer Warnausgabe führen, vom Fahrer verstanden werden, weswegen unnötige Alarme ebenfalls vom Fahrer nachvollzogen werden können. Die Darbietung der Warnungen steht damit aus Fahrersicht ebenso wie bei korrekten Alarmen im Einklang mit dem intendierten Zweck des Warnsystems.
- *Falsche Alarme* werden von den Fahrern nicht als nützlich erachtet, da sie in Situationen dargeboten werden, die aus Fahrersicht nicht als gefährlich erachtet werden (d.h. es handelt sich auch aus technischer Sicht um eine fehlerhafte Warnausgabe). Die Bedingungen, die zur Warnausgabe führen, können im Gegensatz zu korrekten und unnötigen Alarmen nicht nachvollzogen werden. Die

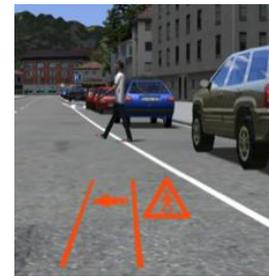
<sup>8</sup> Korrekte Ausgabe, d.h. Warnausgabe, wenn eine Konfliktsituation vorliegt

<sup>9</sup> Falsche Ausgabe, d.h. Warnausgabe, obwohl keine Konfliktsituation vorliegt

Darbietung der Warnung steht nicht im Einklang mit dem intendierten Zweck des Warnsystems.

Tabelle 1: Erweitere Einteilung in falschen – unnötigen – korrekten Alarm in einer Situation mit überschreitendem Fußgänger und Einteilung der Vertrauens-Dimensionen nach Lees und Lee (2007).

Vertrauens-Dimension	Falscher Alarm: kein Fußgänger anwesend	Unnötiger Alarm: Fußgänger betritt Fahrbahn nicht	Korrekter Alarm: Überschreitender Fußgänger
<b>Performance</b>	Nicht nützlich	Nicht nützlich	Nützlich
<b>Process</b>	Nicht vorhersehbar	Vorhersehbar	Vorhersehbar
<b>Purpose</b>	Nicht intendiert	Intendiert	Intendiert



Ausgehend von den Annahmen von Lees und Lee (2007) sind die Nachvollziehbarkeit der Gründe für Ausgaben der Fahrerunterstützung (*process*) sowie deren Vereinbarkeit mit den Intentionen des Herstellers (*purpose*) entscheidende Faktoren dafür, ob sich ein *cry wolf effect* durch falsche Alarmer und eine daraus folgende Wirksamkeitsminderung einstellt. Die Minderung des *cry wolf effects* wurde in verschiedenen Studien berichtet, beispielsweise durch Vorinformationen über die Unzuverlässigkeit von Warnsystemen, die Variation der Situationskonstellation, die zu nachvollziehbaren bzw. nicht nachvollziehbaren Warnungen führten oder die Ausrichtung der Warnintensität an der Zuverlässigkeit des Warnsystems.

Dzindolet, Peterson, Pomranky, Pierce und Beck (2003) untersuchten Auswirkungen von Informationen über die Gründe für die Unzuverlässigkeit eines Warnsystems zur Zielidentifikation im militärischen Kontext. Probanden sollten entscheiden, ob auf verschiedenen Fotos mit Waldaufnahmen Soldaten in Tarnkleidung anwesend waren und wurden dabei von einem Warnsystem unterstützt. Allen Probanden wurde mitgeteilt, dass das Warnsystem fehlerbehaftet sei. Während der Suchaufgabe wurde den Probanden manchmal eine Warnung dargeboten, obwohl auf dem Foto kein Soldat anwesend war. Einer Hälfte der Probanden wurde ein Grund für die Unzuverlässigkeit genannt, so dass diese eine Erklärung für falsche Alarmer hatten. Der Grund bestand darin, dass das Warnsystem bestimmte Baumkonstellationen fälschlicherweise als Menschen klassifizieren würde. Der anderen Hälfte der Probanden wurde kein Grund genannt. Die Probanden berichteten ein größeres Vertrauen in das Warnsystem, wenn ihnen ein Grund für die Ausgabe von falschen Alarmen genannt wurde. Dieses Experiment verdeutlicht, dass Wissen über die Funktionsweise eines Warnsystems (*process*) das Vertrauen in die Unterstützung erhöhen kann.

Neben der expliziten Information über die Funktionsweise eines Warnsystems können Fahrer dieses Wissen auch im Umgang mit dem Warnsystem erlernen. Falls der situative Kontext ein Erlernen der Umstände, die zu der Ausgabe von Warnsignalen führen, erlaubt, tritt der *cry wolf effect* möglicherweise nicht ein. Lees und Lee (2007) untersuchten beispielsweise, ob die Art des falschen Alarms einen Einfluss auf die Wirksamkeit des Warnsystems hat. Die Probanden absolvierten eine Simulatorstrecke, während der sie fünf verschiedene Verkehrskonflikte vermeiden mussten. Die Probanden wurden entweder von

einem Warnsystem unterstützt, welches vor den Konfliktsituationen immer korrekt warnt (100% Zuverlässigkeit, 5 korrekte Warnungen), mit einer hohen Rate an falschen Alarmen (29% Zuverlässigkeit, 5 korrekte und 12 falsche Alarmen), mit einer hohen Rate an unnötigen Alarmen (29% Zuverlässigkeit, 5 korrekte und 12 unnötige Alarme) oder sie absolvierten die Strecke ohne jegliche Unterstützung (between-design).

Das Warnsystem bestand aus einer ungerichteten auditiven Warnung, die zwei Sekunden vor dem Onset des kritischen Verkehrsereignisses ausgegeben wurde. Zusätzlich zu den fünf kritischen Szenarien traten 12 Ereignisse auf, in denen zwar ein Konfliktpartner anwesend war, es letztlich jedoch zu keiner kritischen Situation kam (z.B. PKW fährt aus Parklücke auf den Fahrstreifen des Fahrers, ohne ihn zu gefährden). Die Probanden in der Bedingung mit korrekten Alarmen wurden in diesen Situationen nicht gewarnt, während die Probanden in der Bedingung mit unnötigen Alarmen eine Warnung erhielten. In der Bedingung mit falschen Alarmen erfolgten die 12 zusätzlichen Warnungen (grundlos) 100 Meter vor oder nach den kritischen Ereignissen. In kritischen Situationen, in denen eine Warnung an den Fahrer ausgegeben wurde, reagierten Probanden bei einem System mit unnötigen Alarmen am häufigsten mit Bremsreaktionen verglichen mit den anderen Bedingungen. Falsche, nicht aber unnötige Alarme führten in diesen Situationen zu einer geringeren Geschwindigkeitsreduktion verglichen mit dem Alarmsystem mit korrekten Alarmen. Allerdings führte auch das Warnsystem mit falschen Alarmen in den kritischen Situationen zu einer höheren Geschwindigkeitsreduktion verglichen mit der nicht-assistierten Fahrt.

Eine weitere Möglichkeit zur Minderung der Effekte falscher Alarme besteht in der Verwendung von risikospezifischen Warnungen (sog. *Likelihood Alarm Displays*, siehe Kapitel 3.2.2.4). Statt einer binären Fahrerwarnung (Alarm oder kein Alarm) werden hierbei mehrere Alarmstufen verwendet, die gleichzeitig Informationen über das Kollisionsrisiko enthalten. Ziel davon ist nicht die Minderung falscher Alarme, sondern eine verbesserte Nachvollziehbarkeit von fehlerhaft ausgelösten Alarmen (Vertrauens-Dimension: *process*). Eine derartige Warngestaltung wurde in dieser Arbeit nicht empirisch untersucht, wird aber der Vollständigkeit halber in diesem Abschnitt erläutert.

Gupta et al. (2002) verglichen beispielsweise Fahrerreaktionen auf gestufte und binäre auditive Fahrerwarnungen vor Eisglätte innerhalb einer Simulatorstudie. In der Untersuchung traten in zufälligen Abständen vereiste Flächen auf der Fahrbahn auf, die zu einer Verringerung der Straßenhaftung der Reifen führten. Die Warnungen wurden jeweils in Abhängigkeit vom Reibungskoeffizient zur Straße ausgegeben und hatten, je nach Warnbedingung, verschiedene Auslöseschwellen. Es wurden zwei Eigenschaften des Warnalgorithmus variiert: Sensitivität des Alarms (hoch vs. niedrig) und Risikospezifität des Alarmtons (spezifisch vs. unspezifisch). Bei niedriger Sensitivität wurde ein Alarm bei 80% des Reibungskoeffizienten ausgelöst, der zu einem Schleudern führte. Bei hoher Sensitivität lag die Schwelle lediglich bei 30% des Reibungskoeffizienten. Somit wurden bei hoher Sensitivität mehr Alarme produziert, da die Fahrer auch in Situationen gewarnt wurden, in denen der kritische Reibungskoeffizient noch nicht erreicht war. Bei risikospezifischem Alarmsystem korrespondierte der Warnton jeweils mit dem Schleuderrisiko und wurde ab dem Erreichen der Warnschwelle immer lauter dargeboten. Bei unspezifischem Alarmsystem wurde der Warnton hingegen immer in gleicher Lautstärke abgespielt. Die Wirksamkeit des Warnsystems wurde anhand der Häufigkeit des Spurabkommens gemessen. Bei binärem Warnsystem (risikounspezifisch) fand sich bei hoher Sensitivität der Warnung (mehr falsche Alarme) eine größere Häufigkeit des Spurabkommens als bei niedriger Sensitivität. Bei gestuften Alarmen (risikospezifisch) hingegen war die Häufigkeit des Spurabkommens bei hoher Sensitivität (mehr falsche Alarme) am niedrigsten.

Lee et al. (2004) untersuchten ebenfalls die Wirksamkeit eines risikounspezifischen (binären) gegenüber eines risikospezifischen (gestuften) Warnsystems. Probanden absolvierten hierbei Folgefahrten in einem statischen Fahrsimulator. Während der Folgefahrten bremste das Vorderfahrzeug in zufälligen Intervallen mit unterschiedlicher Stärke ab (vernachlässigbar, mittelstark oder stark). Insgesamt bremste das Vorderfahrzeug 21 Mal,

wobei es drei Mal zu einem starken Bremsenriff kam. Bei den ersten beiden starken Bremsereignissen beschleunigte das Vorderfahrzeug sofort wieder, so dass keine kritische Situation entstand. Nur der letzte starke Bremsenriff führte zu einer Kollision, falls die Probanden nicht reagierten. Diese Situation stellte sogleich die letzte Versuchssituation dar. Die Probanden wurden entweder von einem risikounspezifischen (binären) Alarmsystem unterstützt, bei dem die Warnung nur bei starkem Bremsenriff ausgelöst wurde oder von einem risikospezifischen (gestuften) Alarmsystem, bei welchem bei jedem der Bremsereignisse eine (gestufte) Warnung ausgegeben wurde. Die Warnung wurde entweder visuell-auditiv oder visuell-haptisch (Sitzvibration) dargeboten. Im Mittelpunkt der Studie stand die Reaktion auf das letzte kritische Ereignis. Bei binärer Warnung hatten die Probanden zuvor zwei Warnungen erlebt (bei den ersten beiden starken Bremsenriffen), bei denen ein Eingreifen in die Situation nicht nötig war, wohingegen die Probanden beim gestuften Warnkonzept 20 unnötige Warnungen erlebt hatten. Während 7 von 20 Fahrern in der Bedingung mit binärem Alarm in der kritischen Situation mit dem Vorderfahrzeug kollidierten, war dies beim gestuften Alarm nur bei 3 von 20 Fahrern der Fall. Trotz der höheren Rate an Alarmen vor Situationen, die keinen Fahrereingriff benötigten, hatte das risikospezifische, gestufte Warnkonzept die höhere Wirksamkeit.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die gehäufte Auslösung von Fahrerinformationen in Situationen, die nicht zu einer Kollisionssituation führen, möglicherweise die Wirksamkeit der Fahrerunterstützung einschränkt. Der sogenannte *cry wolf effect* könnte zu einer Erhöhung der Reaktionszeit und/oder einer Verminderung der Reaktionsintensität führen, was eine Wirksamkeitseinschränkung frühzeitiger Fahrerinformationen bedingen könnte. Entscheidend hierfür ist jedoch vermutlich, ob Fahrer (aus technischer Sicht) falsche Alarme tatsächlich auch als solche interpretieren. Das Wissen über die Gründe von fehlerhaften Warnausgaben, bedingt durch Instruktion oder situative Gründe der Warnausgabe, führt unter Umständen dazu, dass der *cry wolf effect* nicht eintritt. In Studie III werden deshalb die Effekte falscher und unnötiger Alarme auf die Fahrerreaktion untersucht.

### 3.4.3 Fehlerhafte Warnausgaben

Bisher untersuchte Warn- und Informationssysteme unterschieden sich deutlich in ihrer Spezifität (d.h. wie spezifisch der Fahrer über die drohende Konfliktsituation informiert bzw. gewarnt wird, siehe Kapitel 3.2). Vor dem Hintergrund möglicher Fehler in der Situationsprädiktion stellen die Warnkonzepte unterschiedliche Anforderungen an die maschinelle Situationsanalyse. Sobald der Inhalt einer Fahrerwarnung über die reine Anzeige, dass eine Konfliktsituation detektiert wurde (unspezifische Warnung), hinausgeht, können die zusätzlich an den Fahrer übermittelten Informationen fehlerbehaftet sein (im Fall von spezifischen Warnungen). Bisherige Studien behandeln diesen Punkt entweder gar nicht oder nur in geringem Umfang. Die in Kapitel 3.2 eingeführte Einteilung von Fahrerinformationen und -warnungen kann jedoch als Beispiel dienen, um fehlerhafte Warnausgaben unterschiedlicher Spezifität zu systematisieren (siehe Tabelle 2).

Die bereits vorgeschlagene Unterteilung wurde in Tabelle 2 erweitert. Sie zeigt mögliche Folgen der Unsicherheit bei der den Warnausgaben zu Grunde liegenden Situationsprädiktion. So ist es beispielsweise möglich, dass die Art des Konfliktpartners (z.B. Fußgängerwarnung, obwohl Auffahrunfall bevorsteht), die Richtung des Konfliktpartners (z.B. Warnung vor einem kreuzenden Fahrzeug von rechts, obwohl das Fahrzeug von links kommt), die Entfernung zum prädizierten Konfliktpunkt (z.B. Anzeige, dass Stauende in 1 km erreicht wird, obwohl es unmittelbar bevorsteht) oder auch das aktuelle Kollisionsrisiko fehlerhaft erfasst (z.B. Anzeige einer Fahrerinformation, obwohl Kollision kurz bevor steht) und an den Fahrer fehlerhaft gemeldet wird. Diese unterschiedlichen Arten von fehlerhaften Meldungen könnten mit spezifischen Folgen für die Aufmerksamkeitsausrichtung (bspw. wenn die Aufmerksamkeit des Fahrers in eine falsche Richtung gelenkt wird) oder Fahrerreaktion (Brems- und Lenkreaktion) einhergehen. Diese sollten bei Gestaltungsempfehlungen für frühzeitige Fahrerinformationen berücksichtigt werden.

Tabelle 2: Einteilung von Fahrerwarnungen bzw. -informationen nach deren Spezifität und mögliche Folgen der Unsicherheit der Situationsprädiktion.

Spezifität	Beschreibung	Beispiel	Mögliche Folgen der Unsicherheit in der Situationsprädiktion
Unspezifische Warnung	Anzeige, dass ein Konflikt vorliegt.		Keine Anzeige, obwohl Konflikt vorliegt
Konfliktspezifität	Zusätzliche Anzeige der Art des Konfliktpartners.		Anzeige des falschen Konfliktpartners
Richtungsspezifität	Zusätzliche Anzeige der Richtung, aus welcher der Konflikt droht.		Anzeige der falschen Konfliktrichtung
Abstandsspezifität	Zusätzliche Anzeige der Entfernung zum Konfliktpunkt.		Fehlerhafte Anzeige der Entfernung zum Konflikt
Risikospezifität	Zusätzliche Anzeige des Kollisionsrisikos.		Fehlerhafte Anzeige des Kollisionsrisikos

Beispielhaft kann an dieser Stelle eine Untersuchung von Totzke, Volk, Naujoks und Krüger (2013) angeführt werden. Probanden wurden während einer simulierten Autobahnfahrt mit unregelmäßig auftretenden Stauenden von einem C2X-basierten, fehlerbehafteten Warnsystem unterstützt. Das Warnsystem informierte die Probanden in der Anfahrt an Stauenden über die verbleibende Distanz zum Stauende (abstandsspezifische Warnung), wobei die Distanzangaben in manchen Fällen fehlerhaft waren. In diesem Fall wurde das Stauende 1 km vor der prädierten Position erreicht. Die fehlerhaften Distanzangaben führten zu einer Minderung des Vertrauens und der Akzeptanz des Warnsystems, ohne jedoch einen bedeutenden Einfluss auf das Fahrverhalten (Bremsverhalten beim Erreichen der Stauenden) zu nehmen. In diesem Beispiel ging die in einer vorangegangenen Studie gezeigte Wirksamkeitssteigerung von Stauende-Warnungen durch abstandsspezifische

gegenüber unspezifischen Anzeigen (Totzke et al., 2012) folglich nicht mit einer Steigerung der Kritikalität einher, wenn der Abstand falsch angezeigt wurde.

Herzberg (2012) untersuchte die Auswirkungen fehlerhafter Richtungsanzeigen in einem urbanen Verkehrsszenario. In der Anfahrt an eine T-Kreuzung wurden Probanden über eine bevorstehende Konfliktsituation (ausparkendes Fahrzeug) 70 Meter vor Erreichen der Kreuzung visuell informiert (between-design). Die Warnung war entweder unspezifisch, richtungsspezifisch-korrekt (Richtung des Konfliktpartners wird korrekt angezeigt) oder richtungsspezifisch-fehlerhaft (fehlerhafte Konfliktrichtung wird angezeigt). Eine weitere Experimentalgruppe absolvierte die Situation ohne Unterstützung. Im Hinblick auf die objektive Kritikalität der Situation (minimaler Meterabstand zum ausparkenden Fahrzeug, minimale TTC) zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Bedingungen. Die fehlerhafte Anzeige der Konfliktrichtung führte nicht zu einer Verschärfung der Kritikalität. Trotzdem führten die fehlerhaften Richtungsanzeigen zu deutlichen Einschränkungen der Akzeptanz der Fahrerunterstützung. Dies drückte sich in einer reduzierte Zustimmung zu den Items „*Wie gut finden Sie die Funktion insgesamt?*“ und „*Wie gerne möchten Sie ein Fahrzeug mit diesem Assistenten fahren?*“ verglichen mit der unspezifischen und richtungsspezifisch-korrekten Anzeige aus.

Vorliegende Studien zeigen übereinstimmend keinen negativen Effekt fehlerhafter Warnausgaben auf die Kritikalität von Verkehrskonflikten. Gleichwohl ist davon auszugehen, dass mit fehlerhaften Warnungen Einschränkungen der subjektiven Beurteilung der Fahrerunterstützung einhergehen. Da bisher nur wenige empirische Arbeiten vorliegen und die Akzeptanz der Fahrerunterstützung möglicherweise ein entscheidender Faktor dafür ist, ob sich positive Effekte auf die Verkehrssicherheit tatsächlich einstellen (da die Fahrerunterstützung sonst möglicherweise nicht genutzt wird), wird die Frage nach den Auswirkungen fehlerhafter Richtungsanzeigen im empirischen Teil der Arbeit anhand einer größeren Auswahl an Verkehrsszenarien im Rahmen von Studie III erneut aufgegriffen.

### **3.5 Zusammenfassung: Prototypische Fahrerunterstützung**

In diesem Kapitel wurden Untersuchungen, die für die Gestaltung einer frühzeitigen Fahrerunterstützung relevant sind, systematisiert und zusammengefasst. Als Arbeitsgrundlage für die folgenden empirischen Untersuchungen werden Empfehlungen für die Ausgestaltung der Fahrerunterstützung formuliert.

#### **3.5.1 Zeitpunkt**

In Anlehnung an Zeitfenster für dringliche Kollisionswarnungen kann als untere Grenze für das Zeitfenster von frühzeitigen Fahrerinformationen der Zeitpunkt angenommen werden, bei dem noch ca. eine Sekunde bis zur notwendigen Einleitung eines starken Bremsengriffs zur Verfügung steht (sog. letztmöglichster Warnzeitpunkt,  $t_0$ ). Vereinzelt lieferten Studien bereits Hinweise darauf, dass auch frühzeitige Warnungen bzw. Informationen (verglichen mit heutigen, auf Bordsensorik basierenden Warnkonzepten) den Fahrer wirksam bei der Unfallvermeidung unterstützen können (Lenné & Triggs, 2008; Werneke & Vollrath, 2013; Yan et al., 2014). Eine systematische Untersuchung verschiedener Darbietungszeitpunkte fehlt jedoch bislang.

#### **3.5.2 Spezifität**

Auf Basis der vorliegenden Untersuchungen kann davon ausgegangen werden, dass richtungsspezifische Anzeigen einen positiven Einfluss auf die Wirksamkeit der Fahrerunterstützung haben (Weller et al., 2014; Zarife, 2014; Zhang et al., 2014), während eine Wirksamkeitssteigerung durch konfliktspezifische Anzeigen bislang nicht berichtet wurde (Cummings et al., 2007; Ho & Cummings, 2005; Thoma et al., 2009; Zarife, 2014). Gleichwohl könnten konfliktspezifische Anzeigen eine Steigerung der subjektiven Nützlichkeit mit sich bringen (Totzke & Volk, 2013). Aufgrund der methodischen Heterogenität und der

teilweise widersprüchlichen Ergebnisse der vorliegenden Studien wird die Spezifität des Anzeigekonzepts in einer eigenen Studie untersucht.

### **3.5.3 Dringlichkeit**

International gültige Standards sehen vor, dringliche Fahrerwarnungen visuell-auditiv oder visuell-haptisch zu übermitteln. Aus diesem Grund sollen die in dieser Arbeit untersuchten frühzeitigen Fahrerinformationen zunächst ebenfalls visuell-auditiv präsentiert werden, jedoch mit geringerer Dringlichkeit. Die Frage, ob eine auditive Komponente der Fahrerinformation in Anbetracht von deren Frühzeitigkeit tatsächlich notwendig ist, wird ebenfalls empirisch untersucht.

## 4 Studie I: Zeitfenster frühzeitiger Fahrerinformationen

### 4.1 Fragestellung

Es ist davon auszugehen, dass der zeitlichen Gestaltung von Fahrerinformationen über drohende Konfliktsituationen eine entscheidende Rolle für deren Wirksamkeit zukommt (siehe Kapitel 3.1). Einerseits müssen die Informationen frühzeitig genug an den Fahrer übermittelt werden, damit diesem noch ausreichend Reaktionszeit zur Kollisionsvermeidung bleibt. Andererseits sollten Fahrerinformationen so spät wie möglich dargeboten werden, da zu erwarten ist, dass die frühzeitige Übermittlung das Auftreten von falschen Alarmen begünstigt (Brown et al., 2001; Lee et al., 2002; McGehee et al., 2002). Im Fokus meiner ersten Studie stand deshalb die Frage, zu welchem Zeitpunkt Fahrer optimalerweise über drohende Verkehrskonflikte zu informieren sind. Um diese Frage zu beantworten, wurden Probanden in einem Fahrsimulator mit einer breiten Auswahl an zeitkritischen Konfliktsituationen (UV<sub>1</sub>: Szenario) konfrontiert und zu verschiedenen Zeitpunkten (UV<sub>2</sub>: Zeitpunkt) durch visuell-auditive Fahrerinformationen vor drohenden Kollisionen unterstützt. Diese wurden in einem simulierten Head-Up Display dargeboten.

Um eine Evaluation der Generalisierbarkeit der Ergebnisse über verschiedene urbane Verkehrskonflikte hinweg zu ermöglichen, wurden verschiedene Konfliktszenarien im Längsverkehr („Auffahren in einer Kolonne“ und „Überschreitender Fußgänger“) und im Kreuzungsbereich („Abbiegender PKW“, „Kreuzender PKW“, „Rechtsabbiegen – querender Fußgänger“ und „Rechtsabbiegen – querender Radfahrer“) als Versuchssituationen verwendet. Die Zeitpunkte der Informationsdarbietung variierten vom letztmöglichen Warnzeitpunkt ( $t_0$ ) in Stufen von einer Sekunde bis zu vier Sekunden vor diesem Zeitpunkt (d.h.  $t_0$  vs.  $t_{0+1s}$  vs.  $t_{0+2s}$  vs.  $t_{0+3s}$  vs.  $t_{0+4s}$ ). In einer weiteren Versuchsbedingung fand keine Fahrerunterstützung statt. Die verschiedenen Assistenzbedingungen (ohne Unterstützung und verschiedene Informationszeitpunkte) und Szenarien wurden innerhalb eines Versuchsdurchlaufs zufällig variiert (d.h. die Informationszeitpunkte wurden nicht blockweise variiert).

Um die Wirkung der verschiedenen Zeitpunkte der Informationsdarbietung zu evaluieren, wurden sowohl objektive Kriterien (Anteil kritischer Begegnungen, Time-to-arrival zum jeweiligen Konfliktpunkt bei Bremsbeginn, maximale Bremspedalstellung) als auch subjektive Kriterien (Einschätzung der Kritikalität der Situationen, Einschätzung der Rechtzeitigkeit und Nützlichkeit der Fahrerinformationen) herangezogen. Hauptfokus der Studie war die Untersuchung des Informationszeitpunkts, ab dem sich eine Reduktion der Situationskritikalität gegenüber nicht-assistierten Fahrten einstellt. Im Folgenden wird zunächst das methodische Vorgehen beschrieben.

### 4.2 Methodik

#### 4.2.1 Versuchsumgebung

Für den Versuch wurde der statische Fahrsimulator der WIVW GmbH verwendet. Die Fahrzelle des Simulators ist einem Fahrzeug der Mercedes-Benz Sprinterklasse nachempfunden (siehe Abbildung 8).



Abbildung 8: Statischer Fahrsimulator der WIVW GmbH (links: Außenansicht, rechts: Innenansicht).

Die Projektion des Sichtsystems erfolgt über fünf DLP-Projektoren. Über die fünf Kanäle wird ein frontales und seitliches Sichtfeld entsprechend einem Bildausschnitt von 300° dargeboten. Die Auflösung beträgt jeweils 1400x1050 Bildpunkte. Als Außen- und Innenspiegel dienen LCD-Displays. Insgesamt besteht das System aus neun Rechnern. Der Datenaustausch zwischen den Rechnern erfolgt über Ethernet. Als Fahrsimulations-Software wurde SILAB, Version 3, verwendet.

#### 4.2.2 Art der Fahrerunterstützung

Abbildung 9 zeigt die zur Fahrerunterstützung im Head-Up Display (HUD) verwendeten Anzeigeelemente. Diese enthielten Informationen über die Straßengeometrie, die Art des potentiellen Konfliktpartners und die Richtung, aus der sich dieser dem Konfliktpunkt nähert (sog. konflikt- und richtungsspezifische Anzeige, siehe Kapitel 3.2). Die visuellen Elemente der Fahrerunterstützung wurden zentral im HUD dargeboten (siehe Abbildung 10).

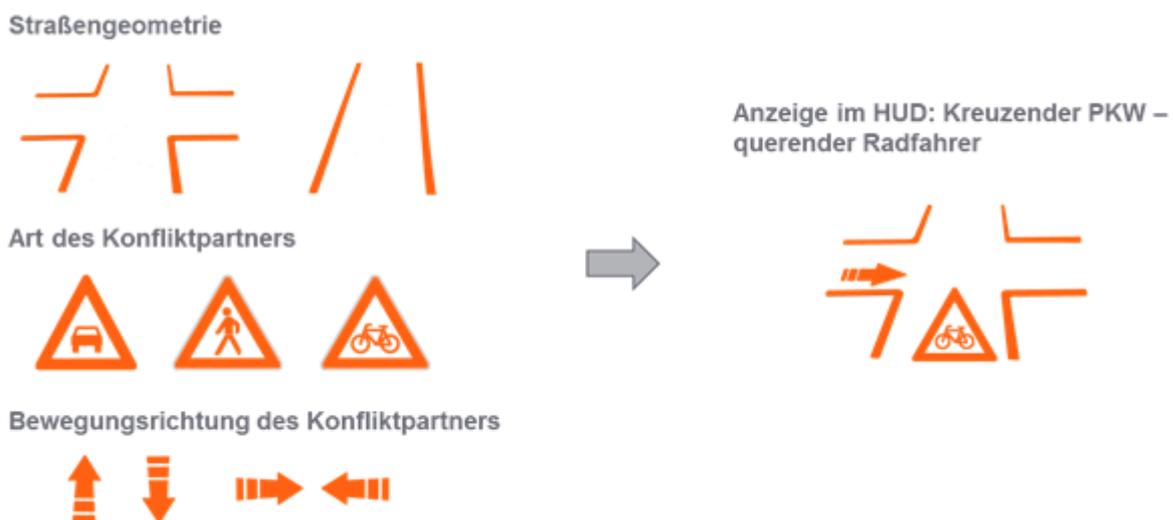


Abbildung 9: Verwendete visuelle Einzelelemente (links) und beispielhafte Darstellung der Anzeige für eine Situation mit kreuzendem Radfahrer (rechts).

Gleichzeitig zu jeder Anzeige im HUD wurde ein informierender Ton abgespielt (500 Hz Sinus; ansteigender und fallender Gradient; Dauer: 500ms). Die konkrete Ausgestaltung der in den visuellen Anzeigen verwendeten Piktogramme sowie des auditiven Signals erfolgte in Anlehnung an ISO/TR 16352 (2005), EN ISO 15008 (2003) sowie den Richtlinien von Campbell et al. (2007). Es ist anzumerken, dass das HUD in dieser Studie simuliert wurde, indem die visuellen Anzeigeelemente direkt in die Szenerie projiziert wurden (d.h. die

Elemente wurden in gleicher Ebene wie die simulierte Verkehrsszenarie dargestellt, siehe Abbildung 10, links)<sup>10</sup>. Ziel dieser Anzeige war vor allem, dass die Probanden ihren Blick nicht von der zentralen Verkehrsszenarie abwenden mussten, um die Fahrerinformationen lesen zu können. Die Leinwand (frontal) war 2.6 m vom Probanden entfernt (gemessen von der Kopflehne). Das Abbild des Head-Up Displays umfasste ca. 30x30 cm auf der Leinwand (Öffnungswinkel: 6.6°, siehe Abbildung 10, rechts).

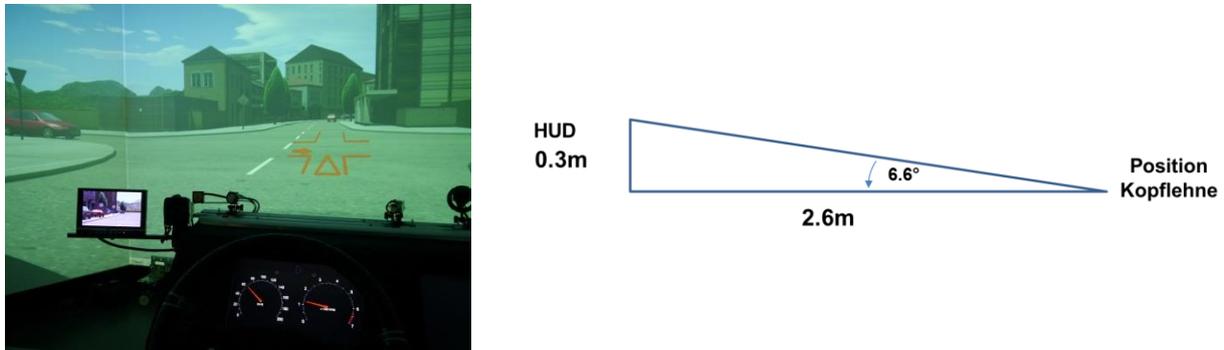


Abbildung 10: Größenverhältnisse der HUD-Anzeige im Fahrsimulator (links) und Skizze der Größenverhältnisse der Anzeige (rechts).

Der Onset der Information wurde durch das Fahrverhalten determiniert, indem die verbleibende Zeit bis zum Erreichen des jeweiligen Konfliktpunkts<sup>11</sup> zur Aktivierung der Fahrerinformationen verwendet wurde. Unter Berücksichtigung der Ausgangsgeschwindigkeit ( $v$ ) wird hierbei davon ausgegangen, dass der Fahrer zum letztmöglichen Warnzeitpunkt  $t_0$  nach der Informationsausgabe unter Annahme einer Reaktionszeit ( $T_r$ ) von einer Sekunde mit einer konstanten Verzögerung von  $-8 \text{ m/s}^2$  in den Stillstand bremst:  $t_0 = T_r + (v/2a)$  mit:  $T_r = 1 \text{ s}$ ,  $a = -8 \text{ m/s}^2$  (siehe Kapitel 3.1.2). Dies basiert auf Annahmen hinsichtlich Reaktionszeit und aufgebrachtener Verzögerung, die im Folgenden ausgeführt werden:

- Um dem Fahrer genügend Zeit zur Einleitung der Bremsreaktion zu geben, wurde eine Sekunde **Reaktionszeit** für den letztmöglichen Warnzeitpunkt angenommen. Green (2000) fasst in einem Überblicksartikel diverse Studien zu Bremsreaktionszeiten zusammen und kommt zu dem Ergebnis, dass die Bremsreaktionszeiten je nach situativer Erwartungshaltung (d.h. inwieweit Fahrer von einer Verkehrssituation überrascht sind) zwischen 0.7 s und 1.5 s liegen. Neukum et al. (2014) untersuchten beispielsweise Bremsreaktionszeiten auf plötzlich bremsende Vorderfahrzeuge im realen Straßenverkehr. Es zeigt sich, dass Probanden etwa eine Sekunde nach dem Aufleuchten der Bremsleuchten des Vorderfahrzeugs selbst eine Bremsreaktion einleiteten.
- Die angenommene **Verzögerung** von  $-8 \text{ m/s}^2$  basiert auf Vorstudien im in dieser Studie verwendeten Fahrsimulator, bei denen vergleichbare Situationen untersucht wurden. Sie stellt einen Richtwert für starke Bremsengriffe dar (siehe auch Neukum et al., 2014, für eine Darstellung real vorkommender Verzögerungen im Straßenverkehr).

Innerhalb dieser Studie wurde das zur Verfügung stehende Zeitfenster zur Reaktion ( $T_r$ ) auf frühzeitige Fahrerinformationen experimentell untersucht, indem der Darbietungszeitpunkt in fünf Stufen variiert wurde (siehe folgender Abschnitt). Wenn es in der Anfahrt an den Konfliktpunkt zu einer Unterschreitung des jeweiligen Zeit-Schwellenwerts kam, wurde die

<sup>10</sup> Normalerweise werden bei HUD-Technologien Informationen in die Windschutzscheibe eingeblendet. Da der zur Verfügung stehende Fahrsimulator keine Windschutzscheibe besitzt, konnte von dieser Möglichkeit kein Gebrauch gemacht werden.

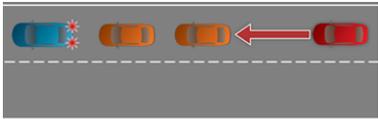
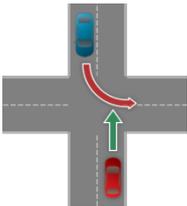
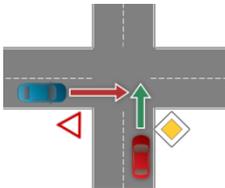
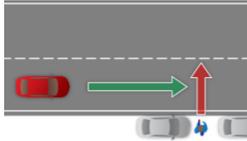
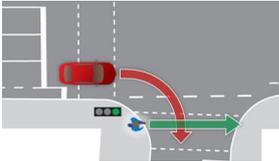
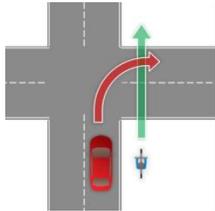
<sup>11</sup> Zeit bis zum Konfliktpunkt [s] = Distanz zum Konfliktpunkt [m] / Geschwindigkeit [m/s]

Informationsdarbietung ausgelöst. Die Information wurde solange angezeigt, bis der Fahrer seine Geschwindigkeit auf unter 3 km/h reduziert hatte, oder bis er über den Konfliktpunkt hinausgefahren war. Bremste der Fahrer jedoch in der Annäherung an die Konfliktsituation selbstständig ab, so dass der Zeit-Schwellenwert nicht unterschritten wurde, wurde keine Information präsentiert. Diese Durchgänge wurden für die Ergebnis-Darstellung ausgeschlossen (siehe Übersicht in Tabelle 5).

### 4.2.3 Versuchsdesign

Für insgesamt fünf innerstädtische Konfliktszenarien und ein Konfliktszenario im Autobahnbereich (vgl. Tabelle 3) wurden die Auswirkungen unterschiedlicher zeitlicher Gestaltungen von frühzeitigen Fahrerinformationen mit einer Stichprobe von  $N = 20$  Versuchsteilnehmern experimentell untersucht.

Tabelle 3: Übersicht über untersuchte Szenarien und visuelle Anzeigen im HUD.

Szenario	Übersicht	HUD-Anzeige
Auffahren in einer Kolonne		
Abbiegender PKW		
Kreuzender PKW		
Überschreiten		
Rechtsabbiegender PKW – querender Fußgänger		
Rechtsabbiegender PKW – querender Radfahrer		

Die Fahrerinformationen wurden zu **fünf verschiedenen Zeitpunkten** in der Anfahrt an die jeweilige Konfliktsituation dargeboten. Die Zeitpunkte reichten vom letztmöglichen Warnzeitpunkt ( $t_0$ ) bis vier Sekunden vor diesen Zeitpunkt ( $t_{0+4s}$ ) in fünf Abstufungen von jeweils einer Sekunde (d.h.  $t_0$  vs.  $t_{0+1s}$  vs.  $t_{0+2s}$  vs.  $t_{0+3s}$  vs.  $t_{0+4s}$ , siehe Tabelle 4 für einen Überblick der realisierten Informationszeitpunkte). Zusätzlich absolvierten die Probanden alle Versuchssituationen **einmalig ohne Unterstützung** (angekündigt durch eine Anzeige im HUD: „kein Empfang“). Es wurde ein vollständig abhängiger Versuchsplan mit den unabhängigen Variablen „Szenario“ und „Zeitpunkt der Informationsdarbietung“ gewählt. Jeder Fahrer absolvierte somit  $6(\text{Szenario}) \times 6(\text{Zeitpunkt}) = 36$  verschiedene Versuchssituationen. Angestrebt wurde sowohl ein Vergleich der Zeitpunkte untereinander als auch ein Vergleich von assistiertem mit nicht-assistiertem Fahren.

Die Situationen (inklusive der unterschiedlichen Zeitpunkte und der Baseline-Bedingung) wurden in randomisierter Reihenfolge dargeboten. Hierzu wurden die Probanden einer von sechs Zufallsabfolgen der Experimentalsituationen zugewiesen. Reihenfolgen mit abfallender bzw. steigender Abfolge des Informationszeitpunkts oder desselben Szenarios hintereinander wurden nicht zugelassen. Um Erwartungseffekten entgegenzuwirken, wurden zudem Füllsituationen erstellt. Füllsituationen stellen analoge Situationen zu den Prüfsituationen dar, ohne dass ein Konflikt entsteht (z.B. Vorbeifahrt an parkenden Fahrzeugen, ohne dass ein Fußgänger auf die Straße tritt oder Durchfahrt von Kreuzungen, ohne dass ein abbiegendes Fahrzeug die Vorfahrt des Probanden nimmt). Das Verhältnis von Füllsituationen und Prüfsituationen lag bei 1:1.

#### 4.2.4 Versuchssituationen

Es wurde angenommen, dass die **Situationskritikalität in den untersuchten Szenarien** davon abhängt, inwieweit Konflikte für die Fahrer **erwartbar** sind. In Tabelle 4 sind die Szenarien nach dem angenommenen Grad der Erwartung eines Verkehrskonflikts angeordnet. In allen Szenarien war die Sicht des Fahrers auf die Konfliktpartner in der Anfahrt an den jeweiligen Konfliktpunkt durch umgebenden Verkehr, parkende Fahrzeuge oder Randbebauung der Szenarien verdeckt.

Tabelle 4: Überblick der Schwellenwerte zur Auslösung der visuell-auditiven Fahrerunterstützung in Abhängigkeit von der für das jeweilige Szenario festgelegten Entwurfsgeschwindigkeit, d.h. der Geschwindigkeit, die für die Berechnung der Warnzeitpunkte angenommen wurde. Bei Abbiege-Szenarien wurde eine Entwurfsgeschwindigkeit von 25 km/h festgelegt, da die Fahrer beim Erreichen des Konfliktpunkts beim Abbiegen ihre Geschwindigkeit reduzieren. Die Schwellenwerte gelten hierbei für alle Versuchspersonen (d.h. der Schwellenwert des Informationszeitpunkts wurde nicht individuell bestimmt).

Szenarien	Erwartung	v [km/h]	Informationszeitpunkt [s]				
			$t_0$	$t_{0+1s}$	$t_{0+2s}$	$t_{0+3s}$	$t_{0+4s}$
Auffahren in einer Kolonne	niedrig	130	3.26	4.26	5.26	6.26	7.26
Abbiegender PKW	niedrig	50	1.87	2.87	3.87	4.87	5.87
Kreuzender PKW	niedrig	50	1.87	2.87	3.87	4.87	5.87
Überschreiten	niedrig	50	1.87	2.87	3.87	4.87	5.87
Rechtsabbiegender PKW – querender Fußgänger	hoch	25	1.43	2.43	3.43	4.43	5.43
Rechtsabbiegender PKW – querender Radfahrer	hoch	25	1.43	2.43	3.43	4.43	5.43

In manchen Szenarien wurde erwartet, dass Fahrer schon in der Anfahrt an die jeweiligen Konflikte antizipativ mit einer Anpassung des Fahrverhaltens reagieren würden (**Erwartung hoch**). Dies gilt insbesondere für solche Szenarien, in denen sich Fahrer Kreuzungen

annähern, an welchen sie wartepflichtig sind. Hier wird davon ausgegangen, dass die Fahrer ihre Geschwindigkeit in der Anfahrt an die Konfliktpunkte selbstständig reduzieren und den vorrangberechtigten Konfliktpartnern Vorfahrt gewähren. In diesem Versuch traf dies auf zwei Abbiege-Szenarien an ampelgeregelten Kreuzungen zu (siehe Abbildung 11 und Abbildung 12).



Abbildung 11: Situation „Rechtsabbiegender PKW – querender Fußgänger“: Umsetzung der Verdeckungssituation durch parkende Fahrzeuge und verschiedene Objekte aus Fahrersicht in der Anfahrt an die Kreuzung (links). Die Vogelperspektive (rechts) zeigt den abbiegenden Ego-Fahrer und den querenden Fußgänger.



Abbildung 12: Situation „Rechtsabbiegender PKW“ – querender Radfahrer“: Umsetzung der Verdeckungssituation durch parkende Fahrzeuge am Straßenrand aus Fahrersicht (links) und Vogelperspektive (rechts). Die Vogelperspektive zeigt den Ego-Fahrer (dunkelgraues Fahrzeug) und den sichtverdeckten Radfahrer.

In anderen Szenarien wurde angenommen, dass die Konfliktsituationen für die Fahrer überraschend sind (**Erwartung niedrig**). In diesen Szenarien wird davon ausgegangen, dass den Fahrern aufgrund der fehlenden Vorhersehbarkeit der Konfliktsituation keine rechtzeitige Anpassung des Fahrverhaltens möglich ist, wodurch es vermehrt zu kritischen Konfliktsituationen kommen kann. Für den Versuch wurden mehrere solcher Konfliktsituationen ausgewählt, in denen dem Fahrer an Kreuzungen von einem anderen Verkehrsteilnehmer die Vorfahrt genommen wird (siehe Abbildung 13 und Abbildung 14).



Abbildung 13: Situation „Abbiegender PKW“: In dieser Situation nimmt dem Ego-Fahrer ein abbiegender PKW die Vorfahrt. Umsetzung der Verdeckungssituation durch einen entgegenkommenden LKW aus Sicht des vorfahrtsberechtigten Ego-Fahrers (links) und Vogelperspektive (rechts).

Zusätzlich wurden Szenarien in die Untersuchung aufgenommen, in denen die Konfliktsituationen plötzlich auftreten, wie beispielsweise ein Fußgänger, der zwischen parkenden Fahrzeugen auf die Fahrbahn tritt (vgl. Abbildung 15) oder ein plötzliches Abbremsen eines Vorderfahrzeugs (vgl. Abbildung 16).



Abbildung 14: Situation „Kreuzender PKW“: Umsetzung der Verdeckung durch parkende Fahrzeuge; Sicht des wartepflichtigen Ego-Fahrers (links) und Vogelperspektive von der gegenüberliegenden Seite (rechts).



Abbildung 15: Situation „Überschreiten“: Umsetzung der Verdeckungssituation durch parkende Fahrzeuge aus Fahrersicht (links). Die Vogelperspektive (rechts) von der gegenüberliegenden Seite zeigt den herannahenden Ego-Fahrer und den querenden Fußgänger.



Abbildung 16: Situation „Auffahren in einer Kolonne“: Umsetzung der Verdeckungssituation durch einen vorausfahrenden Kleinbus aus Fahrersicht (links) und Vogelperspektive (rechts).

#### 4.2.5 Häufigkeit der Informationsdarbietung

Tabelle 5 zeigt die Häufigkeiten der Auslösung der Fahrerunterstützung pro Szenario und Informationszeitpunkt im Überblick. Wie aus Tabelle 5 hervorgeht, unterschritten die Fahrer in den Szenarien mit fehlender Vorhersehbarkeit der Konfliktentwicklung (Erwartung: niedrig) mehrheitlich die Schwellenwerte für die Auslösung der Fahrerunterstützung. Bei Fahrerunterstützung zum letztmöglichen Warnzeitpunkt  $t_0$  oder einer Sekunde vor diesem Zeitpunkt ( $t_{0+1s}$ ) ist dies in den vorhersehbaren Szenarien (Erwartung: hoch) mehrheitlich nicht der Fall. Hier reduzierten die Fahrer in der Anfahrt an die Konfliktsituation von sich aus ihre Geschwindigkeit so frühzeitig, dass keine Fahrerunterstützung dargeboten wurde. In der Fahrt ohne Unterstützung kam die Prüfsituation in drei Fällen nicht wie geplant zustande (siehe Abschnitt 4.3.2).

Tabelle 5: Überblick über die Häufigkeit der Auslösungen der Fahrerunterstützung getrennt nach Situation und Informationszeitpunkt.

Szenario	ohne	$t_0$	$t_{0+1s}$	$t_{0+2s}$	$t_{0+3s}$	$t_{0+4s}$	Erwartung
Auffahren in einer Kolonne	18	18	18	18	16	18	niedrig
Abbiegender PKW	20	20	19	20	20	20	niedrig
Kreuzender PKW	20	20	20	20	20	20	niedrig
Überschreiten	20	12	20	20	20	20	niedrig
Rechtsabbiegen – querender Fußgänger	19	4	17	20	20	20	hoch
Rechtsabbiegen – querender Radfahrer	20	3	7	16	19	20	hoch

#### 4.2.6 Abhängige Variablen

Während der Fahrt wurden mehrere objektive Parameter der Situationskritikalität (z.B. TTC, TTA) und der Bremsreaktion (z.B. Bremspedalstellung) mit einer Rate von 100 Hz aufgezeichnet (siehe Tabelle 6). Um die Wirkung der verschiedenen Zeitpunkte zu evaluieren, wurden sowohl objektive Kriterien (Anteil kritischer Begegnungen, Time-to-arrival zum Konfliktpunkt bei Bremsbeginn, maximale Bremspedalstellung) als auch subjektive Kriterien (Einschätzung der Kritikalität der Situationen, Einschätzung von Rechtzeitigkeit und Nützlichkeit der Fahrerinformatoren) herangezogen. Hauptfokus der Studie war es, zu evaluieren, ab welchem Informationszeitpunkt sich eine Reduktion der Situationskritikalität gegenüber nicht-assistierten Fahrten einstellt.

**Häufigkeit kritischer Begegnungen:** Kritische Begegnungen wurden pro Versuchssituation über die in der Situation minimal zur Verfügung stehende Zeit zur Kollisionsvermeidung bestimmt. Diese ergibt sich bei Konfliktpartnern in gleicher Bewegungsrichtung aus der sogenannten Time-to-collision ( $TTC = \text{Abstand [m]} / \text{Relativgeschwindigkeit [m/s]}$ ). Bei

kreuzender Bewegungsrichtung wird die sogenannte Time-to-arrival herangezogen ( $TTA = \text{Abstand [m]} / \text{Geschwindigkeit Ego-Fahrzeug [m/s]}$ , siehe Abbildung 17). Erreichen  $TTA/TTC$ -Werte den Wert Null, liegt eine Kollision vor. Wird ein Grenzwert von einer Sekunde unterschritten (Hayward, 1972; van der Horst, 1990), kann von einem Beinahe-Unfall (englisch: „near miss“) ausgegangen werden. Im Folgenden werden solche Situationen, in denen der Grenzwert von einer Sekunde unterschritten wurde, als „kritische Situationen“ bezeichnet.

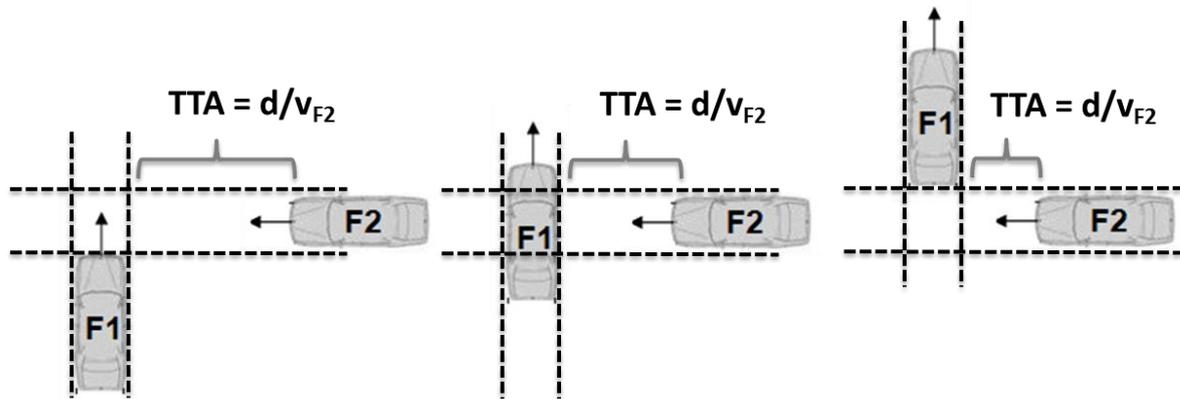


Abbildung 17: Berechnung der Time-to-arrival (TTA): Die minimale TTA stellt den minimal zur Verfügung stehenden Zeitabstand zu einem kreuzenden Konfliktpartner dar, so lange sich dieser im „Fahrerschlauch“ des Ego-Fahrers (dargestellt durch gestrichelte Linien) befindet.

Die Dichotomisierung der eigentlich stetigen Variablen  $TTC_{\min}/TTA_{\min}$  (und die damit einhergehende Informationsreduktion) hat den Hintergrund, dass in der vorliegenden Versuchsanordnung sowohl bei  $TTA_{\min}$  als auch bei  $TTC_{\min}$  Ausreißer-Werte zu erwarten sind. Hat der Fahrer seine Geschwindigkeit in der Anfahrt an den Konfliktpunkt (z.B. Kollisionspunkt mit überschreitendem Fußgänger) durch eine frühzeitige Information über den Konflikt schon deutlich reduziert, resultieren aufgrund der Berechnungsvorschrift sehr große  $TTC_{\min}/TTA_{\min}$ -Werte. Diese machen eine sinnvolle inferenzstatistische Auswertung von Maßen der zentralen Tendenz (z.B. der mittleren  $TTC_{\min}/TTA_{\min}$ -Werte) nicht möglich.

**Time-to-arrival bei Bremsbeginn:** Die Time-to-arrival bei Bremsbeginn stellt den noch verbleibenden Zeitabstand zum Konfliktpunkt bei Bremsbeginn des Fahrers dar (d.h. wie frühzeitig der Fahrer vor Erreichen des Konfliktpunkts mit einer Bremsreaktion beginnt, siehe Abbildung 18). Als Bremsbeginn wird der Zeitpunkt definiert, bei dem der Fahrer durch Bremspedalbetätigung eine Schwelle von 1% der maximal möglichen Bremspedalstellung (100%: Bremspedal ist vollständig durchgedrückt) erreicht hat. Bremst der Fahrer in der Situation nicht, kann diese Variable nicht berechnet werden.

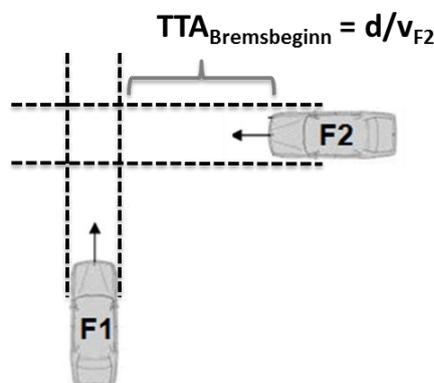


Abbildung 18: Berechnung der TTA bei Bremsbeginn: Die TTA bei Bremsbeginn stellt die noch zur Verfügung stehende Zeit bis zum Erreichen des Konfliktpunkts dar, sobald der Proband mit dem Bremsen beginnt.

**Maximale Bremspedalstellung:** Um zu untersuchen, wie stark die Probanden in den Situationen bremsen, wird die maximale Bremspedalstellung betrachtet. Kritische Verkehrssituationen erfordern in der Regel eine starke Bremsreaktion. Die Höhe der maximalen Bremspedalstellung kann folglich als Indikator für die Kritikalität einer Situation verwendet werden. Eine Alternative hierzu hätte in der Betrachtung der maximalen Verzögerung bestanden. Die maximale Bremspedalstellung wurde an dieser Stelle vorgezogen, da sie nicht an die Umsetzung der Fahrereingabe in die simulierte Fahrzeugverzögerung durch die Simulationssoftware gekoppelt ist, und somit ein direkteres Maß der Fahrerreaktion darstellt. Schwellenwerte zur Beurteilung der Bremsintensität liegen in der Literatur nicht vor. Deswegen werden die Bremsreaktionen zur Beurteilung, wie stark die Probanden in den jeweiligen Situationen bremsen mussten, aufgrund folgender, selbst definierter Grenzen eingestuft: < 10%: „kaum wahrnehmbarer Bremseneingriff“; 10-50%: „mittelstarker Bremseneingriff“, 50-90%: „starker Bremseneingriff“, > 90%: „Vollbremsung“.

Tabelle 6: Übersicht objektive Parameter.

Objektive Parameter	Beschreibung	Einheit
<b>Häufigkeit kritischer Situationen</b>		
Anteil kritischer Begegnungen	Unterschreitung des $TTA_{\min}$ / $TTC_{\min}$ -Schwellenwert von 1s	[% Fahrten]
<b>Bremsreaktion</b>		
TTA bei Bremsbeginn	Zeitabstand zum Konfliktpunkt bei Einleitung des Bremsmanövers	[s]
Maximale Bremspedalstellung	Maximale Betätigung des Bremspedals beim Abbremsen	[% der maximalen Bremspedalstellung]

Direkt nach den Prüfsituationen wurden die Probanden vom Versuchsleiter zur Situationskritikalität, Rechtzeitigkeit und Nützlichkeit der dargebotenen Fahrerinformation befragt<sup>12</sup> (siehe Tabelle 7).

**Situationskritikalität:** Ein zentrales Maß zur Beschreibung der Verkehrssituationen ist die vom Fahrer wahrgenommene Kritikalität. Zu deren Erfassung wird die sogenannte „Skala zur Bewertung der Kritikalität von Fahr- und Verkehrssituationen“ eingesetzt (Neukum, Lübbecke, Krüger, Mayser & Steinle, 2008; Abbildung 19), die bislang vor allem in Untersuchungen zur Beherrschbarkeit von fehlerhaften Eingriffen durch Assistenzsysteme (z.B. ESP) in die Fahrzeugführung Anwendung fand. Bei der Skala handelt es sich um eine modifizierte Fassung einer für die Einstufung von Querdynamikstörungen (z.B. fehlerhafte Lenkwinkel- bzw. Lenkmomentüberlagerungen) entwickelten Bewertungsskala (Neukum & Krüger, 2003). Aufgabe des Probanden ist es, zunächst eine Einschätzung der Kritikalität der Situation durch Nennung einer verbalen Antwortkategorie abzugeben. Im zweiten Schritt erfolgte eine feinere, numerische Einstufung. Der Vorteil dieser Kategorienskala besteht in der klaren Definition von subjektiven Toleranzgrenzen der Situationskritikalität. Diese sind durch die Benennung der Kategorien („nichts bemerkt“, „harmlos“, „unangenehm“, „gefährlich“ und „nicht kontrollierbar“) eindeutig definiert. Auf diese Weise geht klar hervor, in welche Kategorienbereiche Situationen eingeordnet werden sollen, die vom Fahrer als sicherheitsrelevant (mindestens „gefährlich“, > 6 Skalenpunkte) erlebt werden.

<sup>12</sup> Dazu wurden die Probanden vom Versuchsleiter über eine Sprechanlage außerhalb des Simulatorraums aufgefordert, kurz anzuhalten. Die Antwortskalen standen den Probanden im Simulator zur Verfügung.

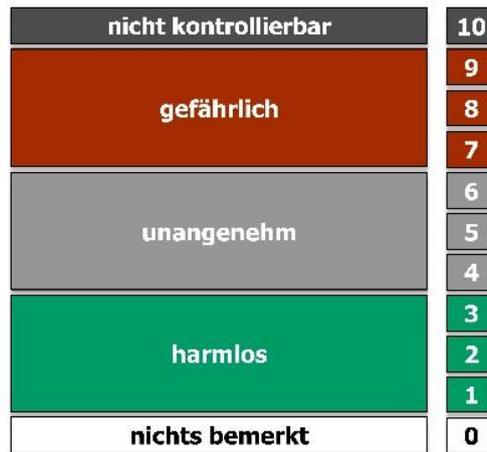


Abbildung 19: Skala zur Bewertung der Kritikalität von Fahr- und Verkehrssituationen (nach Neukum et al., 2008).

Auch für die Einschätzung der Rechtzeitigkeit und Nützlichkeit der Fahrerinformationen wurden hierarchische Kategorienunterteilungsskalen verwendet, die zunächst eine verbale Beschreibung und im zweiten Schritt eine feinere, numerische Einstufung verlangten (sog. Kategorienunterteilungsverfahren, Heller, 1985, siehe Abbildung 20). Tabelle 7 gibt einen Überblick über die subjektiven Maße.

Wie rechtzeitig war die Information?

zu früh	etwas zu früh	genau richtig	etwas zu spät	zu spät
-2	-1	0	1	2

Wie hilfreich war die Information?

gar nicht	sehr wenig hilfreich			wenig hilfreich			mittel hilfreich			hilfreich		sehr hilfreich			
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Abbildung 20: Fragen und Antwortformat zur Beurteilung der Rechtzeitigkeit (oben) und Nützlichkeit (unten) der Fahrerunterstützung.

Tabelle 7: Übersicht subjektive Variablen.

Subjektive Variable	Frage	Skala
<b>Fahrtbefragung</b>		
Situationskritikalität	Wie kritisch war die Situation?	0 bis 10, Situationsbeurteilungsskala (Neukum et al., 2008)
Rechtzeitigkeit	Wie rechtzeitig war die Information?	-2 bis 2 (KU-Skala)
Nützlichkeit	Wie hilfreich war die Information?	1 bis 15, Zusatzkategorie 0 (KU-Skala)

### 4.2.7 Stichprobe

An dem Versuch nahmen elf Männer und neun Frauen verschiedener Altersstufen ( $N = 20$ ; 20-29 Jahre:  $n = 6$ , 30-39 Jahre:  $n = 4$ , 40-49:  $n = 0$ , 50-59 Jahre:  $n = 1$ , 60-69 Jahre:  $n = 6$  und  $\geq 70$  Jahre:  $n=3$ ) aus dem Fahrerpanel der WIVW GmbH teil. Die jährliche Fahrleistung der Probanden betrug im Mittel ca. 20000 km ( $SD = 31671$ ). Alle Probanden hatten vor der Versuchsteilnahme an einem ausführlichen Fahrertraining teilgenommen, das aus mehreren Sitzungen bestand. Inhalt des Trainings ist beispielweise das Anfahren und Bremsen mit dem simulierten Fahrzeug oder das Durchfahren von Kurven sowie das Abbiegen. Ziel des

Trainings ist es, Übungseffekte im Umgang mit dem simulierten Fahrzeug zu minimieren und durch Gewöhnung an die Simulationsumgebung eventuell auftretende Übelkeitseffekte (*simulator sickness*) zu verringern (S. Hoffmann & Buld, 2006).

#### 4.2.8 Versuchsablauf

Der Versuchsablauf der ersten Studie ist in Tabelle 8 dargestellt. Nach der Begrüßung durch den Versuchsleiter wurden die Probanden zunächst über ihre Fahraufgabe instruiert. Die Instruktion bestand darin, die Strecken zügig und unter Beachtung der Straßenverkehrsordnung zu durchfahren. Außerdem wurden die Fahrer vor Beginn der Versuchsfahrt darüber informiert, dass sie während des Versuchs durch ein Assistenzsystem unterstützt werden würden. Eine Erklärung der visuellen Anzeige und der verschiedenen Informationszeitpunkte erfolgte jedoch nicht. Es folgte eine kurze Eingewöhnungsfahrt in der Innenstadt, bei der die Fahrer sich erneut an die Fahrsimulation gewöhnen konnten<sup>13</sup>. Im Anschluss fand der Hauptversuch statt.

Tabelle 8: Versuchsablauf Studie I.

Versuchsteil	Inhalt	Dauer (min)
Begrüßung und Instruktion	Probanden werden begrüßt und erhalten die Instruktion zur Fahraufgabe	5
Einfahren	Eine kurze Innenstadtstrecke wird zur erneuten Gewöhnung an die Fahrsimulation durchfahren	10
Hauptversuch	Prüfparcours mit kritischen Situationen und Füllsituationen wird durchfahren	70
Nachbefragung	Nachbefragung und Verabschiedung	5

### 4.3 Ergebnisse

#### 4.3.1 Vorgehen bei der Ergebnisdarstellung

Vorrangiges Ziel dieses Versuchs war die Untersuchung des Zeitfensters für effektive frühzeitige Fahrerinformationen. Die Ergebnisdarstellung erfolgt in zwei Schritten.

**Schritt I:** Für die Evaluation der Wirksamkeit der Fahrerunterstützung ist es von großer Bedeutung, ab welchem Informationszeitpunkt sich eine Reduktion des Anteils an kritischen Begegnungen der Probanden mit den jeweiligen Konfliktpartnern im Vergleich zur nicht-assistierten Fahrt ergibt. In einem ersten Schritt wird deshalb der Anteil kritischer Begegnungen in den assistierten Fahrten untereinander und mit der nicht-assistierten Fahrt verglichen.

**Schritt II:** Im nächsten Schritt werden die Informationszeitpunkte  $t_{0+1s}$  bis  $t_{0+4s}$  untereinander hinsichtlich der restlichen, in Abschnitt 4.2.6 dargestellten Variablen verglichen. Ziel dieser Analyse ist es, zu untersuchen, ob die Wirksamkeit und Akzeptanz der Fahrerinformationen durch eine frühzeitigere Darbietung als  $t_{0+1s}$  noch weiter gesteigert wird.

Die Verwendung verschiedener Versuchsszenarien diente vorwiegend dem Zweck, die Generalisierbarkeit der Ergebnisse über verschiedene Situationen hinweg überprüfbar zu machen. Haupteffekte des Versuchsszenarios werden deshalb zwar berichtet, aber nicht erläuternd ausgeführt. Falls sich Interaktionen mit den Versuchsszenarien ergeben, liefert dies einen Hinweis auf die Abhängigkeit des jeweiligen Ergebnisses von den untersuchten Szenarien. In diesen Fällen werden die Ergebnisse ausgeführt.

<sup>13</sup> Da alle Probanden bereits ein Simulator-Training erhalten hatten, wird an dieser Stelle von „erneuter“ Gewöhnung gesprochen.

### 4.3.2 Missings

Da die Prüfsituationen nicht in der geplanten Weise zustande kamen, fehlen in den folgenden Fällen Daten:

- In der Situation „Auffahren in einer Kolonne“ folgten einige Probanden der Fahrzeugkolonne nicht mit ausreichender Geschwindigkeit, so dass sie den Anschluss zur Fahrzeugkolonne verloren (Häufigkeit fehlender Werte: keine Info: 2,  $t_{0+1s}$ : 2,  $t_{0+2s}$ : 2,  $t_{0+3s}$ : 4,  $t_{0+4s}$ : 2). In diesen Fällen wurde die Fahrerunterstützung nicht wie geplant dargeboten, weswegen keine Daten aufgezeichnet werden konnten.
- In der Situation „Rechtsabbiegen – querender Fußgänger“ näherte sich ein Fahrer mit überhöhter Geschwindigkeit der Kreuzung und bog ab, bevor der Fußgänger die Straße überquerte. Für diesen Fall können ebenfalls keine Werte berichtet werden.

Zusätzlich zu diesen fehlenden Werten wurde in einigen Fällen aufgrund eines frühzeitigen Bremsengriffs der Probanden die Darbietung der Fahrerinformation unterdrückt. Dies traf vor allem auf die beiden Abbiege-Situationen bei zusätzlich spätem Informationszeitpunkt zu. Eine Übersicht der gültigen Situationen ist in Tabelle 5 zu finden.

### 4.3.3 Anteil kritischer Begegnungen

Wie in Abbildung 21 dargestellt, ist der Anteil an kritischen Begegnungen vorwiegend abhängig vom Informationszeitpunkt. Die meisten kritischen Begegnungen ereignen sich in Situationen ohne Unterstützung (34% kritische Begegnungen) und mit Fahrerinformationen zum letztmöglichen Warnzeitpunkt ( $t_0$ : 58% kritische Begegnungen). Verglichen mit der Baseline-Fahrt steigt somit der Anteil an kritischen Begegnungen, wenn die Fahrerinformationen zum letztmöglichen Warnzeitpunkt  $t_0$  dargeboten werden. Ab einem Zeitpunkt von einer Sekunde vor dem letztmöglichen Warnzeitpunkt ( $t_{0+1s}$ ) ist der Anteil an kritischen Begegnungen im Vergleich zur nicht-assistierten Fahrt deutlich reduziert (Anteil kritischer Begegnungen:  $t_{0+1s}$ : 8%,  $t_{0+2s}$ : 2%,  $t_{0+3s}$ : 6%,  $t_{0+4s}$ : 3%, siehe Abbildung 21). Um die berichteten Effekte zufallskritisch abzusichern, wird eine logistische Regression mit den Prädiktoren „Zeitpunkt der Informationsdarbietung“, „Szenario“ und der Interaktion „Zeitpunkt\*Szenario“ mit der abhängigen Variable Situationskritikalität (kritische vs. sichere Begegnung) durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 9 aufgeführt.

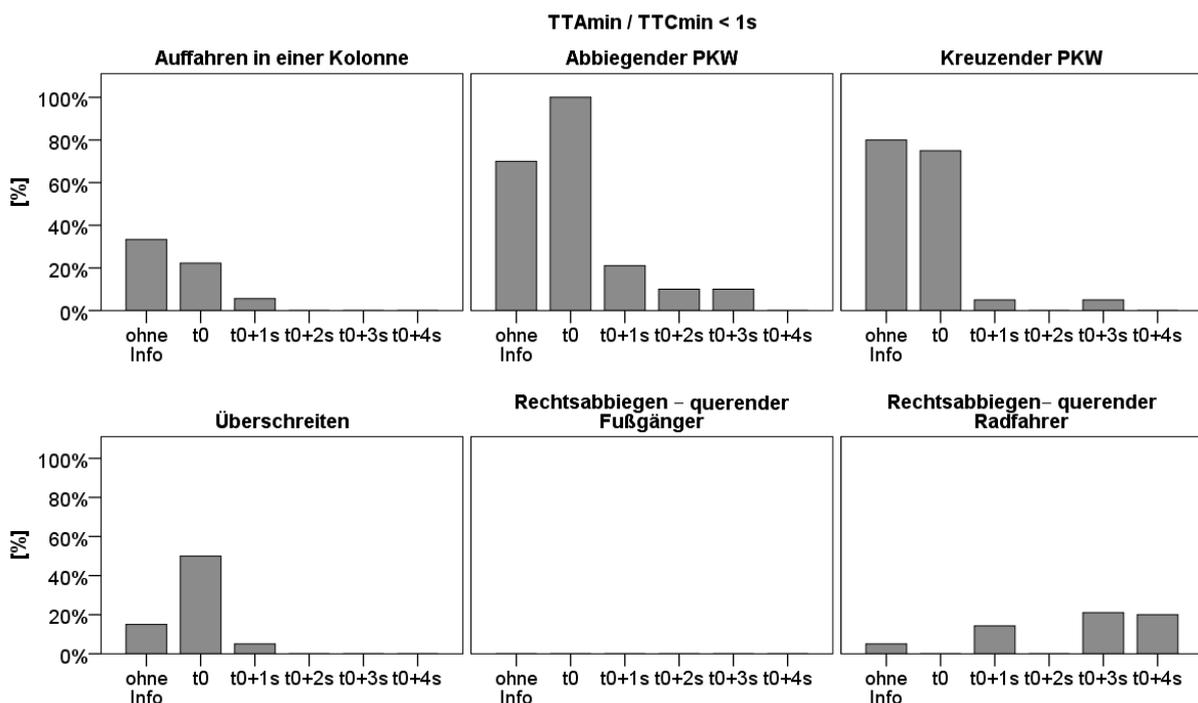


Abbildung 21: Anteil kritischer Begegnungen ( $TTA_{min}/TTC_{min} < 1s$ ).

Tabelle 9: Logistische Regression; AV: Kritikalität (kritische vs. sichere Begegnung); UVn: Zeitpunkt, Szenario, Interaktion; Methode: Einschluss; Referenzkategorien: Baseline (Zeitpunkt). Modelgüte:  $\chi^2 = 302.45$ ,  $df = 35$ ,  $p < .001$ .

Prädiktor	B	Wald	df	p	OR
Zeitpunkt	-	103.04	5	<.001	-
$t_0$	0.86	5.61	1	.018	2.36
$t_{0+1s}$	-2.22	23.16	1	<.001	0.11
$t_{0+2s}$	-3.82	24.96	1	<.001	0.02
$t_{0+3s}$	-2.48	27.45	1	<.001	0.08
$t_{0+4s}$	-3.11	29.19	1	<.001	0.05
Szenario	-	40.32	5	<.001	-
Zeitpunkt*Szenario	-	39.28	25	.035	-

Die Chance, dass die Situationen in einer kritischen Begegnung resultieren, hängt vom jeweiligen Szenario (Prädiktor: **Szenario**) und vom Zeitpunkt der Informationsdarbietung (Prädiktor: **Zeitpunkt**) ab. Im Hinblick auf den Zeitpunkt der Informationsdarbietung werden die deskriptiven Ergebnisse bestätigt: Ab einem Informationszeitpunkt von  $t_{0+1s}$  fällt die Chance, dass die Situation in einer kritischen Begegnung endet, deutlich geringer aus als in der Baseline-Fahrt. Werden die Informationen erst zum letztmöglichen Warnzeitpunkt  $t_0$  dargeboten, zeigt sich hingegen eine Steigerung der Chance für kritische Begegnungen.

Die Interaktion aus den beiden Prädiktoren ist ebenfalls signifikant (Prädiktor: **Szenario\*Zeitpunkt**). Um zu überprüfen, inwieweit sich der Anteil kritischer Situationen zwischen den Informationszeitpunkten in den einzelnen Versuchssituationen unterscheidet, werden  $\chi^2$ -Tests mit der Häufigkeit kritischer Situationen als abhängige Variable und dem Informationszeitpunkt als unabhängige Variable durchgeführt. Wie aus Tabelle 10 hervorgeht, findet sich ein durch verschiedene Informationszeitpunkte bedingter Unterschied im Anteil kritischer Begegnungen ( $TTC_{min}/TTA_{min} < 1s$ ) nur in solchen Szenarien, in denen die Konfliktsituationen schwer zu antizipieren sind (Erwartung: niedrig). In den übrigen Szenarien treten entweder keine kritischen Situationen auf oder die Fahrerunterstützung beeinflusst die Häufigkeit kritischer Begegnungen nicht (vgl. Abbildung 21). In den Szenarien „Überschreiten“ und „Abbiegender PKW“ ist der Anteil kritischer Begegnungen bei Fahrerinformationen zum letztmöglichen Warnzeitpunkt ( $t_0$ ) gegenüber der nicht-assistierten Fahrt erhöht (siehe Tabelle 11).

Tabelle 10:  $\chi^2$ -Tests auf Unterschiede in der Häufigkeit von  $TTC_{min}/TTA_{min}$ -Werten  $< 1s$ . Im Szenario „Rechtsabbiegen – querende Fußgänger“ können diese nicht berechnet werden, da keine Situation mit  $TTA_{min} < 1s$  auftritt.

Szenario	Erwartung	$\chi^2$	df	p
Auffahren in einer Kolonne	niedrig	19.39	5	.002
Abbiegender PKW	niedrig	71.02	5	<.001
Kreuzender PKW	niedrig	75.61	5	<.001
Überschreiten	niedrig	32.06	5	<.001
Rechtsabbiegender PKW – querender Fußgänger	hoch	-	-	-
Rechtsabbiegender PKW – querender Radfahrer	hoch	6.34	5	.274

Tabelle 11: Kontraste zwischen den Informationszeitpunkten: Dargestellt sind  $p$ -Werte des Kontrasts in der Häufigkeit kritischer Situationen zur nicht-assistierten Fahrt mit dem exakten Test nach Fischer.

Szenario	Kontrast zur nicht-assistierten Fahrt				
	$t_0$	$t_{0+1s}$	$t_{0+2s}$	$t_{0+3s}$	$t_{0+4s}$
Auffahren in einer Kolonne	.711	.088	.019	.020	.019
Abbiegender PKW	.020	.004	<.001	<.001	<.001
Kreuzender PKW	1.000	<.001	<.001	<.001	<.001
Überschreiten	.049	.605	.231	.231	.231
Rechtsabbiegen – querender Fußgänger	-	-	-	-	-
Rechtsabbiegender PKW – querender Radfahrer	-	-	-	-	-

#### 4.3.4 Vergleich früher und später Informationszeitpunkte

Um die Wirkung der Fahrerinformationen weiter zu untersuchen, werden die frühzeitigen Informationszeitpunkte (beginnend ab dem Zeitpunkt  $t_{0+1s}$ ) in ihrer Wirkung auf Fahrverhalten und subjektive Urteile weiter untersucht. Hierbei gehen folgende Daten aufgrund zu kleiner Zellbesetzungen nicht in die Analyse ein (siehe Tabelle 5):

- Die Bedingung mit Informationen zum letztmöglichen Warnzeitpunkt ( $t_0$ ) geht aufgrund zu geringer Zellbesetzung in den Szenarien „Überschreiten“ und „Rechtsabbiegen – querender Radfahrer“ nicht in die Analyse ein, da sich ansonsten die Stichprobe aufgrund des Messwiederholungsdesigns stark reduziert hätte. Im Szenario „Rechtsabbiegen – querender Radfahrer“ liegen auch zu  $t_{0+1s}$  zu wenige Werte vor, weswegen das Szenario nicht in die Betrachtung eingeht.
- Einige wenige Fahrer reagieren in manchen Situationen nicht mit einer Bremsreaktion (siehe Tabelle 12). Für diese Fahrer kann deswegen keine TTA bei Bremsbeginn bestimmt werden. Die maximale Bremspedalstellung beträgt in diesen Fällen 0% und kann somit in die Analyse eingehen. Fälle, die nicht in die Auswertung eingehen sind in Tabelle 12 grau hinterlegt.

Tabelle 12: Anzahl der Probanden mit/ohne Bremsreaktion. Grau hinterlegte Zellen werden in der Auswertung nicht einbezogen.

Szenario	Zeitpunkt						
	gebremst	ohne Info	$t_0$	$t_{0+1s}$	$t_{0+2s}$	$t_{0+3s}$	$t_{0+4s}$
Auffahren in einer Kolonne	ja	18	18	18	18	16	18
	nein	0	0	0	0	0	0
Abbiegender PKW	ja	13	19	17	19	20	20
	nein	7	1	2	1	0	0
Kreuzender PKW	ja	14	17	19	20	20	20
	nein	6	3	1	0	0	0
Überschreiten	ja	20	12	20	20	20	20
	nein	0	0	0	0	0	0
Rechtsabbiegen – querender Fußgänger	ja	19	4	17	20	20	20
	nein	0	0	0	0	0	0
Rechtsabbiegen– querender Radfahrer	ja	20	3	7	16	19	20
	nein	0	0	0	0	0	0
Gesamt	ja	104	73	98	113	115	118
	nein	13	4	3	1	0	0
	Gesamt	117	77	101	114	115	118

#### 4.3.4.1 Time-to-arrival bei Bremsbeginn

Abbildung 22 zeigt die Time-to-arrival bei Bremsbeginn. Es wird ersichtlich, dass die Probanden bei umso größerem Zeitabstand zum Konfliktpunkt mit dem Bremsen beginnen je früher sie über den Konflikt informiert werden (Effekt **Zeitpunkt**). Geplante Kontraste zeigen, dass sich die einzelnen Stufen (Vergleich zum jeweils nächst früheren Zeitpunkt) auch untereinander signifikant unterscheiden.

Die Auswirkung des Informationszeitpunkts hängt hierbei vom Szenario ab (Interaktion **Szenario\*Zeitpunkt**). Die Interaktion aus Szenario und Informationszeitpunkt ist in Abbildung 23 dargestellt. Aus der Abbildung wird deutlich, dass sich der bereits auf globaler Ebene gezeigte Effekt des früheren Bremsbeginns bei früherem Zeitpunkt der Informationsdarbietung in unterschiedlicher Ausprägung ebenfalls auf Ebene der Einzelszenarien zeigt. In den Szenarien „Überschreiten“ und „Abbiegender PKW“ bremsen die Probanden bei jedem Informationszeitpunkt früher als beim jeweils nächst späteren Informationszeitpunkt (siehe Tabelle 13). In den übrigen Szenarien unterscheiden sich nicht alle Informationszeitpunkte signifikant voneinander, wenn auch der generelle Trend zum früheren Bremsbeginn bei früherer Informationsdarbietung in allen Szenarien erhalten bleibt.

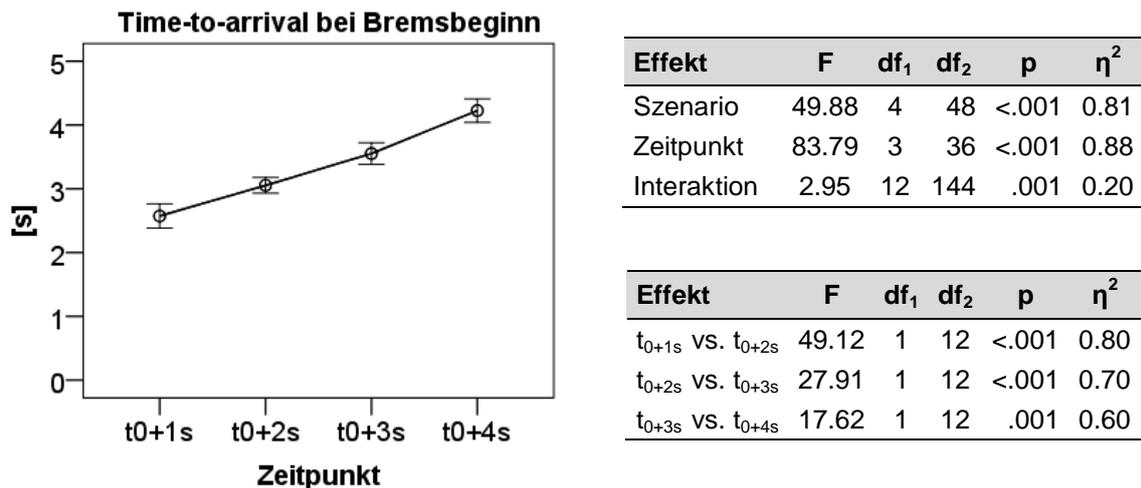
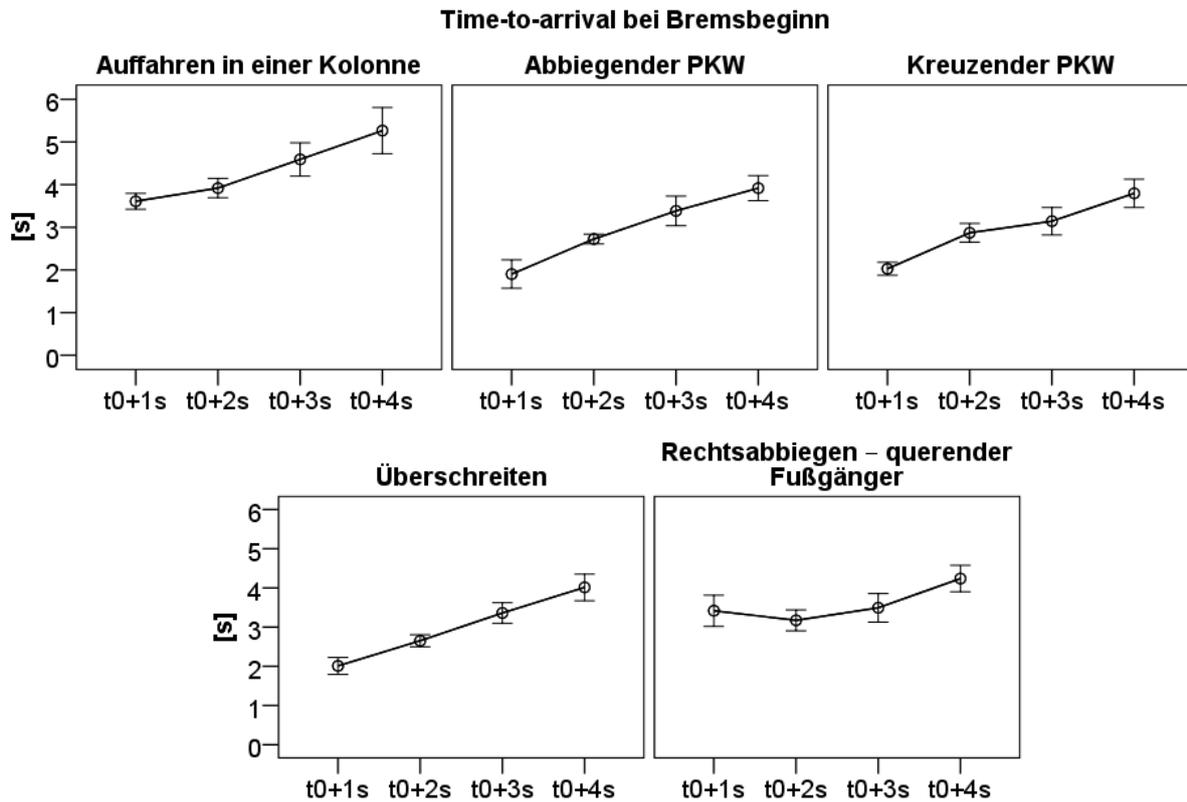


Abbildung 22: Time-to-arrival bei Bremsbeginn; dargestellt sind deskriptive Ergebnisse (Mittelwert und Konfidenzintervall (links), ANOVA-Ergebnisse (rechts, oben) und geplante Kontraste zwischen den Informationszeitpunkten (rechts, unten).



Szenario	F	df <sub>1</sub>	df <sub>2</sub>	p	η <sup>2</sup>
Auffahren in einer Kolonne	16.36	3	45	<.001	0.52
Abbiegender PKW	43.12	3	48	<.001	0.73
Kreuzender PKW	56.57	3	54	<.001	0.76
Überschreiten	76.38	3	57	<.001	0.80
Rechtsabbiegen – querender Fußgänger	7.54	3	48	<.001	0.32

Abbildung 23: Time-to-arrival bei Bremsbeginn; dargestellt sind deskriptive Ergebnisse (Mittelwert und Konfidenzintervall der einzelnen Szenarien (oben), sowie ANOVA-Ergebnisse (unten).

Tabelle 13: TTA bei Bremsbeginn; geplante Kontraste zwischen den Informationszeitpunkten. Dargestellt sind p-Werte des Kontrasts zum Zeitpunkt t<sub>0+1s</sub>.

Szenario	Kontrast			
	t <sub>0+1s</sub>	t <sub>0+1s</sub> vs. t <sub>0+2s</sub>	t <sub>0+2s</sub> vs. t <sub>0+3s</sub>	t <sub>0+3s</sub> vs. t <sub>0+4s</sub>
Auffahren in einer Kolonne	-	.062	.006	.098
Abbiegender PKW	-	<.001	.002	.015
Kreuzender PKW	-	<.001	.093	<.001
Überschreiten	-	<.001	<.001	<.001
Rechtsabbiegen – querender Fußgänger	-	.142	.010	.046

#### 4.3.4.2 Maximale Bremspedalstellung

Abbildung 24 stellt die maximale Bremspedalstellung für die verschiedenen Informationszeitpunkte dar. Auch hier wird ein Effekt des **Informationszeitpunkts** deutlich. Im Gegensatz zur TTA bei Bremsbeginn führen noch frühere Informationen als  $t_{0+2s}$  zu keiner weiteren Senkung der Bremsstärke (siehe Abbildung 24). Zusätzlich zum Haupteffekt des Informationszeitpunkts ergibt sich eine signifikante Interaktion aus **Informationszeitpunkt und Szenario**. Die Mittelwerte der maximalen Bremspedalstellung sind in Abbildung 25 getrennt nach Szenario abgebildet. In allen Szenarien, außer „Auffahren in einer Kolonne“, findet sich ein signifikanter Einfluss des **Zeitpunkts** der Informationsdarbietung auf die maximale Bremspedalstellung.

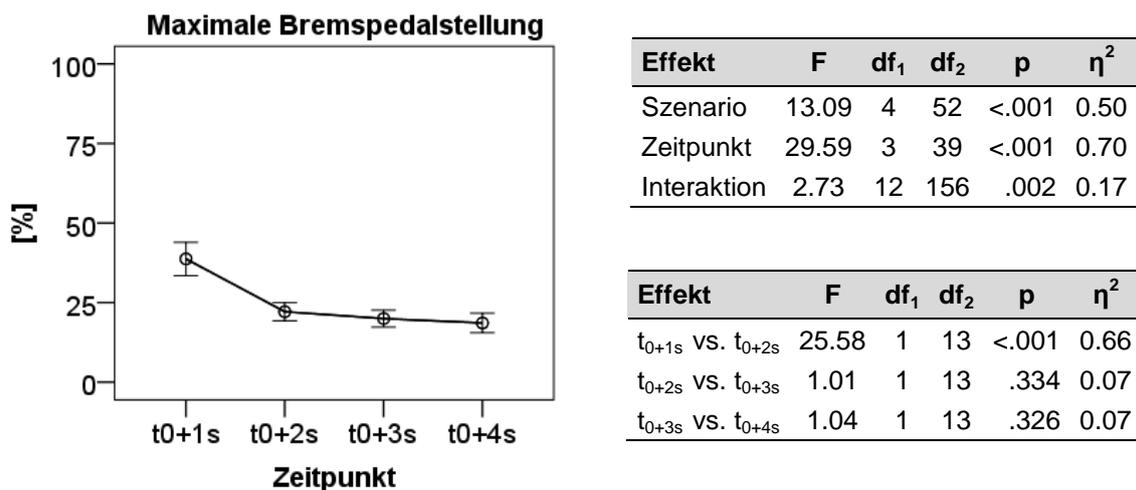
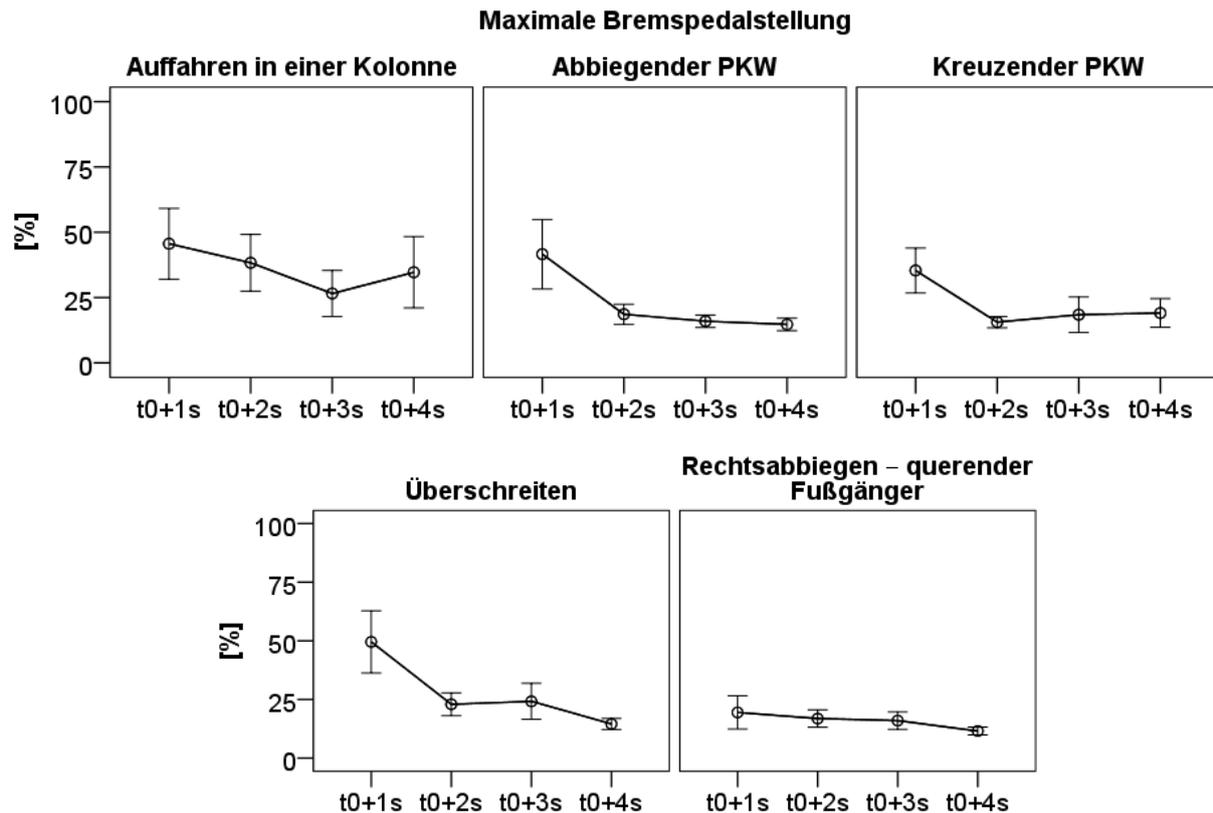


Abbildung 24: Maximale Bremspedalstellung; dargestellt sind deskriptive Ergebnisse (Mittelwert und Konfidenzintervall (links), ANOVA-Ergebnisse (rechts, oben) und geplante Kontraste zwischen den Informationszeitpunkten (rechts, unten).

Sofern der Haupteffekt Informationszeitpunkt signifikant ist, bremsen die Fahrer mit geringerer Stärke, wenn sie zwei Sekunden ( $t_{0+2s}$ ) verglichen mit einer Sekunde ( $t_{0+1s}$ ) vor dem letztmöglichen Warnzeitpunkt informiert werden (siehe Tabelle 14). Noch frühere Informationen senken die Bremsstärke nicht weiter. Eine Ausnahme bildet das Szenario „Rechtsabbiegen, querender Fußgänger“. Verglichen mit den übrigen Szenarien liegen bei diesem Szenario die Werte der maximalen Bremspedalstellung bei allen Informationszeitpunkten auf einem geringen Niveau. Eine Senkung der Bremsstärke ist nur bei einem Vergleich der Zeitpunkte  $t_{0+3s}$  und  $t_{0+4s}$  zu beobachten.



Szenario	F	df <sub>1</sub>	df <sub>2</sub>	p	η <sup>2</sup>
Auffahren in einer Kolonne	1.54	3	57	.216	0.09
Abbiegender PKW	16.66	3	54	<.001	0.48
Kreuzender PKW	9.97	3	57	<.001	0.34
Überschreiten	16.63	3	57	<.001	0.47
Rechtsabbiegen – querender Fußgänger	4.01	3	48	.013	0.20

Abbildung 25: Maximale Bremspedalstellung; dargestellt sind deskriptive Ergebnisse (Mittelwert und Konfidenzintervall der einzelnen Szenarien (oben), sowie ANOVA-Ergebnisse (unten).

Tabelle 14: Maximale Bremspedalstellung; geplante Kontraste zwischen den Informationszeitpunkten. Dargestellt sind *p*-Werte des Kontrasts zum Zeitpunkt *t*<sub>0+1s</sub>.

Szenario	Kontrast			
	t <sub>0+1s</sub>	t <sub>0+1s</sub> vs. t <sub>0+2s</sub>	t <sub>0+2s</sub> vs. t <sub>0+3s</sub>	t <sub>0+3s</sub> vs. t <sub>0+4s</sub>
Auffahren in einer Kolonne	-	.373	.179	.511
Abbiegender PKW	-	.002	.202	.183
Kreuzender PKW	-	<.001	.448	.870
Überschreiten	-	<.001	.753	.015
Rechtsabbiegen – querender Fußgänger	-	.391	.396	.006

#### 4.3.4.3 Kritikalitätseinschätzung

Die Einschätzungen der Situationskritikalität sind in Abbildung 26 dargestellt. Auch bei dieser Variable sinken die Kritikalitätsurteile mit früherem **Informationszeitpunkt**, wobei signifikante Unterschiede nur zwischen *t*<sub>0+1s</sub> und *t*<sub>0+2s</sub> sowie *t*<sub>0+3s</sub> und *t*<sub>0+4s</sub> zu finden sind. An dieser Stelle muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass sich die Kritikalitätsurteile bei allen Informationszeitpunkten bereits auf einem niedrigen Niveau befinden (*t*<sub>0+1s</sub>: *M* = 3.89 [„unangenehm“], *SE* = 0.45; *t*<sub>0+2s</sub>: *M* = 3.49 [„harmlos“], *SE* = 0.42; *t*<sub>0+3s</sub>: *M* = 3.34 [„harmlos“],

$SE = 0.48$ ;  $t_{0+4s}$ :  $M = 3.03$  [„harmlos“],  $SE = 0.43$ ). Zwar werden die Szenarien unterschiedlich kritisch eingeschätzt (Effekt **Szenario**), eine Interaktion zwischen **Informationszeitpunkt und Szenario** findet sich jedoch bei dieser Variable nicht.

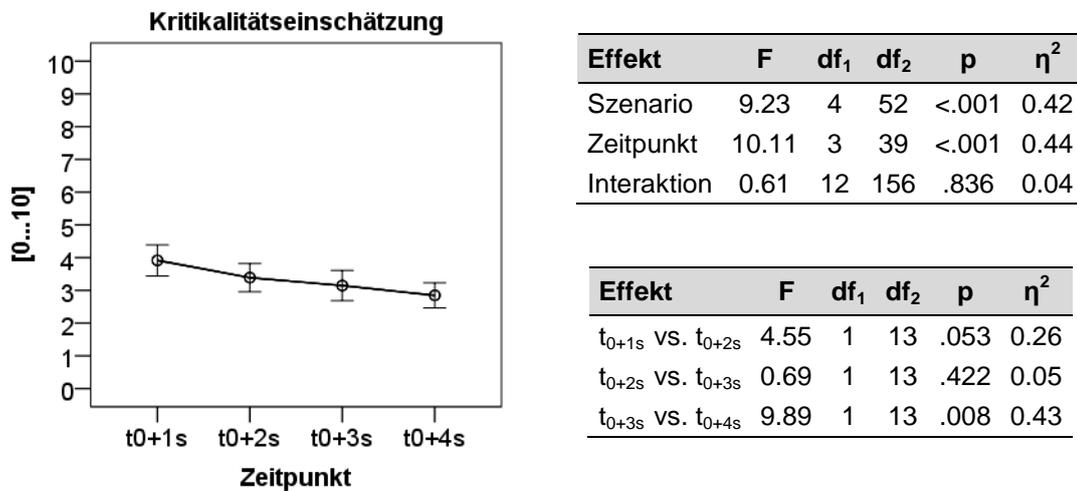


Abbildung 26: Kritikalitätseinschätzung; dargestellt sind deskriptive Ergebnisse (Mittelwert und Konfidenzintervall (links), ANOVA-Ergebnisse (rechts, oben) und geplante Kontraste zwischen den Informationszeitpunkten (rechts, unten).

#### 4.3.5 Subjektive Beurteilung des Informationszeitpunkts

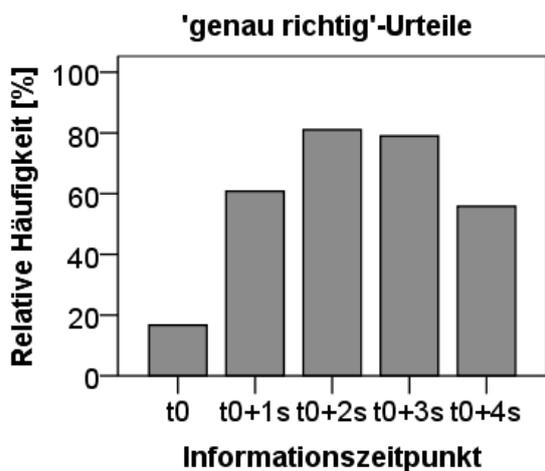
##### 4.3.5.1 Einschätzung der Rechtzeitigkeit

Um die Auswirkungen der Variation des Informationszeitpunkts auf die Beurteilung von dessen Rechtzeitigkeit zu evaluieren, wurde eine logistische Regression (Prädiktoren **Szenario, Zeitpunkt** sowie Interaktion **Szenario\*Zeitpunkt**) mit der abhängigen Variable, ob die Information von den Probanden als „genau richtig“ eingeschätzt wurde, durchgeführt (siehe Tabelle 15). Der **Zeitpunkt** der Informationsdarbietung ist hierbei ein signifikanter Prädiktor, während das **Szenario** und die **Interaktion aus Zeitpunkt und Szenario** keinen Einfluss auf die Urteile haben. Abbildung 27 stellt den Anteil der Situationen dar, in denen die Probanden den Zeitpunkt der Informationsdarbietung als „genau richtig“ einstufen.

Fahrerinformationen zum letztmöglichen Warnzeitpunkt ( $t_0$ ) werden von einem geringen Anteil der Fahrer (17 %) als „genau richtig“ bewertet. Alle späteren Zeitpunkte werden von den Probanden in stärkerem Umfang als „genau richtig“ beurteilt (siehe Tabelle 15, Prädiktor **Zeitpunkt**). Fahrerinformationen zwei bis drei Sekunden vor dem letztmöglichen Warnzeitpunkt ( $t_{0+2s}$  und  $t_{0+3s}$ , siehe auch Tabelle 15) werden von den meisten Fahrern als „genau richtig“ bewertet. Eine noch frühere Darbietung der Informationen ( $t_{0+4s}$ ) führt wieder zu einer Abnahme des Anteils an „genau-richtig“-Urteilen.

Tabelle 15: Logistische Regression; AV: Einschätzung des Zeitpunkts („genau richtig“ vs. restliche Kategorien); UVn: Zeitpunkt, Szenario, Interaktion; Methode: Einschluss, Referenzkategorien:  $t_0$  (Zeitpunkt)<sup>14</sup>; Modelgüte:  $\chi^2 = 148.95$ ,  $df = 29$ ,  $p < .001$ )

Prädiktor	B	Wald	df	p	OR
Zeitpunkt	-	20.77	4	<.001	-
$t_{0+1s}$	2.82	10.23	1	.001	16.71
$t_{0+2s}$	3.58	14.79	1	<.001	36.00
$t_{0+3s}$	4.39	17.38	1	<.001	81.00
$t_{0+4s}$	3.05	11.68	1	.001	21.00
Szenario	-	7.39	5	.193	-
Zeitpunkt * Szenario	-	22.25	20	.327	-



Bedingung	n „genau richtig“	n gültig	%
$t_0$	13	77	17
$t_{0+1s}$	62	101	61
$t_{0+2s}$	94	114	83
$t_{0+3s}$	94	115	82
$t_{0+4s}$	67	118	57

Abbildung 27: Anteil „genau richtig“-Urteile.

#### 4.3.5.2 Nützlichkeitseinschätzung

Während die Fahrerinformationen in den verschiedenen Szenarien als unterschiedlich nützlich beurteilt werden (Effekt **Szenario**), unterscheidet sich die Beurteilung der Nützlichkeit der Informationszeitpunkte ab  $t_{0+1s}$  nicht signifikant (Effekt **Zeitpunkt**, siehe Abbildung 28)<sup>15</sup>. Im Mittel werden die Fahrerinformationen zu den ausgewählten Zeitpunkten als „hilfreich“ ( $M = 10.94$ ,  $SD = 1.76$ ) eingeschätzt.

<sup>14</sup> Die nicht-assistierte Fahrt kann in diesem Fall – im Gegensatz zur vorhergehenden Analyse der Häufigkeit kritischer Begegnungen – nicht als Referenzkategorie dienen, da die Einschätzung der Rechtzeitigkeit der Information in diesem Fall nicht erhoben wurde.

<sup>15</sup> Aufgrund der geringen Zellbesetzung zum Zeitpunkt  $t_0$  geht dieser, wie bei den in Abschnitt 4.3.4 durchgeführten Analysen, nicht in die Analyse ein.

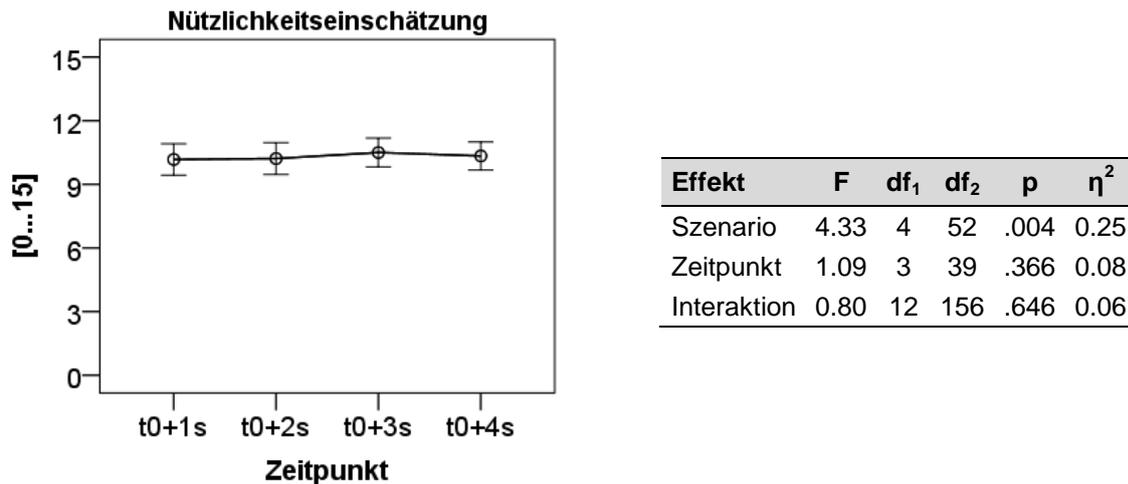


Abbildung 28: Nützlichkeitschätzung, dargestellt sind deskriptive Ergebnisse (Mittelwert und Konfidenzintervall (links) und ANOVA-Ergebnisse (rechts)).

## 4.4 Diskussion

Primäres Ziel der Studie war es, zu untersuchen, wie frühzeitig Fahrerinformationen vor einem drohenden Verkehrskonflikt dargeboten werden sollten, um Fahrer effektiv bei der Vermeidung einer drohenden Kollision zu unterstützen. Hierbei sollten die Probanden so früh wie nötig unterstützt werden, damit sie genügend Zeit zur Vermeidung des Konflikts haben. Gleichzeitig sollten sie so spät wie möglich unterstützt werden, um Einbußen bei der Zuverlässigkeit der Fahrerassistenz zu vermeiden. In den nächsten Abschnitten werden die Studienergebnisse zusammengefasst und anschließend bewertet.

### 4.4.1 Zusammenfassung

Im Hinblick auf die Situationskritikalität lässt sich festhalten, dass Informationen eine Sekunde vor dem letztmöglichen Warnzeitpunkt ( $t_{0+1s}$ ) in allen Situationen, in denen es in der nicht-assistierten Fahrt vermehrt zu kritischen Begegnungen kam, ausreichend waren, um den Anteil kritischer Begegnungen verglichen mit der nicht-assistierten Fahrt zu senken. Während in der nicht-assistierten Fahrt 34% der Begegnungen in kritischen Situationen mündeten, war dies mit Informationen zu  $t_{0+1s}$  nur noch in 8% der Fälle zu beobachten. Spätere Informationen (d.h. zum letztmöglichen Warnzeitpunkt  $t_0$ ) hatten in den Konfliktsituationen keinen positiven Effekt auf das Fahrverhalten. Teilweise führte ein späterer Informationszeitpunkt sogar zu einer Erhöhung der Situationskritikalität gegenüber der nicht-assistierten Fahrt (Anteil kritischer Begegnungen bei  $t_0$ : 58%).

Eine frühere Informationsdarbietung als  $t_{0+1s}$  senkte die Kritikalität nicht weiter, da auch hier vereinzelt noch kritische Begegnungen auftraten (Anteil kritischer Begegnungen:  $t_{0+2s}$ : 2%,  $t_{0+3s}$ : 6%,  $t_{0+4s}$ : 3%). Im Hinblick auf die Fahrerreaktion zeigte sich zwar, dass eine noch frühere Informationsdarbietung als eine Sekunde vor dem letztmöglichen Warnzeitpunkt ( $t_{\text{Information}} > t_{0+1s}$ ) zu einem noch früheren Bremsbeginn (Variable: TTA bei Bremsbeginn) führte. Dagegen sank die Stärke, mit der die Probanden bremsen (Variable: maximale Bremspedalstellung), ab einem Informationszeitpunkt von  $t_{0+2s}$  nicht noch weiter ab. In Bezug auf die subjektive Kritikalitätseinschätzung beurteilten die Probanden die Situationen mit früherem Informationszeitpunkt als  $t_{0+1s}$  zwar noch unkritischer, die Urteile lagen jedoch bei einem Informationszeitfenster von einer Sekunde vor dem letztmöglichen Warnzeitpunkt bereits auf einem geringen Niveau (d.h. die Situationen wurden als „unangenehm“ bis „harmlos“ beurteilt). Die Probanden selbst bewerteten den Zeitpunkt der Informationsdarbietung bei zwei bis drei Sekunden vor dem letztmöglichen Warnzeitpunkt im Hinblick auf dessen Rechtzeitigkeit am besten. Die Informationsdarbietung wurde von den Fahrern generell als nützlich angesehen, wobei eine noch frühere Darbietung der

Fahrerinformationen als eine Sekunde vor dem letztmöglichen Warnzeitpunkt nicht zu einer Steigerung der Nützlichkeits-Urteile führte.

#### 4.4.2 Beurteilung des Zeitfensters für Fahrerinformationen

Als Zeitfenster für effektive Fahrerinformationen kann auf Basis der vorliegenden Ergebnisse mindestens eine Sekunde, im besten Fall jedoch zwei Sekunden vor dem letztmöglichen Warnzeitpunkt, empfohlen werden. Im Hinblick auf die Zuverlässigkeit der Fahrerinformationen sollte die Darbietung gerade frühzeitig genug erfolgen, um eine effektive Unterstützung zu ermöglichen. Auf Basis des objektiven Kriteriums zur Bewertung der Kritikalität der Situationen (d.h. Anteil kritischer Begegnungen) kann diese Anforderung schon bei einem Zeitpunkt von einer Sekunde vor dem letztmöglichen Warnzeitpunkt als erfüllt angesehen werden. Eine frühere Darbietung, beispielsweise zwei Sekunden vor dem letztmöglichen Warnzeitpunkt, erwies sich in mehrfacher Hinsicht als vorteilhaft. Verglichen mit der Darbietung zu  $t_{0+1s}$  begannen die Probanden noch früher zu bremsen, schätzten die Situationen noch unkritischer ein und bewerteten den Zeitpunkt als rechtzeitig. In Anbetracht dessen, dass eine Vergrößerung des Informationszeitfensters um eine Sekunde (von  $t_{0+1s}$  auf  $t_{0+2s}$ ) die Anforderungen an die Situationsanalyse bedeutend erhöhen würde (Seeliger et al., 2014, Weidl et al., 2014), ohne dass es zu einer weiteren Senkung des Anteils kritischer Begegnungen kommt, wird an dieser Stelle trotzdem die Informationsdarbietung zu  $t_{0+1s}$  empfohlen.

#### 4.4.3 Einordnung der Studienergebnisse

Die Studienergebnisse erweitern die bestehenden Erkenntnisse über Fahrerwarnungen und -informationen in mehreren Punkten. Die vorliegenden Ergebnisse legen nahe, dass ein Zeitfenster für frühzeitige Fahrerinformationen mit einer zur Verfügung stehenden Reaktionszeit von 2-3 s ( $t_{0+1s}$ - $t_{0+2s}$ ) ausreicht, um deren Wirksamkeit zu gewährleisten. McGehee et al. (2002) verwendeten einen vergleichbaren Ansatz zur Bestimmung des Zeitpunkts für dringliche Fahrerwarnungen und kamen zu dem Ergebnis, dass dem Fahrer eine Reaktionszeit von 1.5 s eingeräumt werden sollte, um die Wirksamkeit einer Warnung zu garantieren. Bisherige Studien zur Wirksamkeit frühzeitiger Warnungen beschränken sich auf den Vergleich zwischen einer frühen und einer späten Warnung (Lenné & Triggs, 2008; McGehee et al., 2002; Werneke & Vollrath, 2013; Yan et al., 2014), wobei frühe Warnungen stets mit einer Wirksamkeitssteigerung einhergingen. In der vorliegenden Arbeit wurde erstmals eine größere Bandbreite an unterschiedlichen Zeitpunkten miteinander verglichen und infolge dessen untersucht, ab welchem Zeitpunkt sich *keine* weitere Wirksamkeitssteigerung finden lässt. Während in früheren Arbeiten teilweise sehr große Zeitfenster untersucht wurden (Lenné & Triggs, 2008, Totzke et al., 2011), liegt das empfohlene Zeitfenster für Fahrerinformationen in dieser Arbeit nur 0.5 s-1.5 s vor dem von McGehee et al. (2002) verfolgten Ansatz für dringliche Warnungen. Diese Diskrepanz kann einerseits an der in früheren Studien beschränkten Bandbreite an untersuchten Warnzeitpunkten liegen. Andererseits wurden in den angeführten Arbeiten sehr unterschiedliche Anzeigekonzepte verfolgt (z.B. Sprachwarnungen, Yan et al., 2014; visuelle-auditive Warnungen im Head-Down Display, Totzke et al., 2011; visuelle Warnung im Head-Up Display, Werneke & Vollrath, 2013), was die Vergleichbarkeit zu den Ergebnissen dieser Arbeit ebenfalls einschränkt.

Eine wesentliche Erweiterung der Erkenntnisse durch meine Studie ergibt sich durch die Wirksamkeitsuntersuchung der Fahrerinformationen über mehrere Szenarien hinweg. Die Fahrerinformationen in dieser Arbeit reduzierten den Anteil an kritischen Begegnungen sowohl in Szenarien im Längsverkehr („Auffahren in einer Kolonne“ und „Überschreiten“) als auch im Querverkehr („Abbiegender PKW“ und „Kreuzender PKW“). Frühere Arbeiten fokussierten stets auf isolierte Anwendungsfälle, so dass eine Verallgemeinerung der Ergebnisse auf andere Verkehrssituationen schwer möglich war. Die Studienergebnisse legen außerdem eine Abhängigkeit der Wirksamkeit der Fahrerunterstützung von der Möglichkeit zur Antizipation von Verkehrskonflikten nahe, da kritische Begegnungen

vorwiegend in solchen Situationen auftraten, in denen die Konflikte schwer zu erwarten waren.

#### 4.4.4 Negative Effekte der Fahrerinformationen

Als problematisch anzusehen ist die Erhöhung der Situationskritikalität bei Fahrerinformationen zum letztmöglichen Warnzeitpunkt ( $t_0$ ) gegenüber der Bedingung ohne Fahrerunterstützung in den Szenarien „Überschreiten“ und „Abbiegender PKW“. Rechnerisch steht den Fahrern zu diesem Zeitpunkt noch eine Sekunde zur Verfügung, um eine Bremsung einzuleiten. Gegenüber der nicht-assistierten Fahrt findet sich in diesen Szenarien trotzdem eine Erhöhung der Rate an kritischen Begegnungen. Dieser negative Effekt der Fahrerinformationen könnte einerseits durch einen Lerneffekt im Umgang mit der Fahrerunterstützung bedingt sein. Da den Fahrern in den meisten Durchgängen mehr als eine Sekunde Reaktionszeit verblieb, reagierten sie bei diesem späten Informationszeitpunkt eventuell nicht mit einem sofortigen Einleiten des Bremsmanövers, da dies in den übrigen Durchgängen nicht nötig war. Dies würde ein zu starkes „Sich-Verlassen“ (*reliance*, siehe Cotté et al., 2001; Meyer, 2004; Yamada & Kuchar, 2006) auf das Informationssystem, insbesondere bezüglich der noch verbleibenden Zeit bis zum Erreichen des Konflikts, darstellen.

In nicht-assistierten Fahrten wurde den Probanden in dieser Studie rechtzeitig vor dem Erreichen der Situationen angezeigt, dass sie keine Unterstützung erhalten würden (Anzeige: „kein Empfang“). Somit könnte die Erhöhung im Anteil kritischer Begegnungen bei spätem Informationszeitpunkt gegenüber der nicht-assistierten Fahrt weiterhin auf ein risikoreicheres Fahren, etwa durch eine Erhöhung der Geschwindigkeit oder eine vermehrte Blickabwendung von der Straße in Situationen mit Fahrerunterstützung im Vergleich zu Situationen ohne Fahrerunterstützung zurückzuführen sein (siehe bspw. Naujoks & Totzke, 2014). Sogenannte „Verhaltensanpassungen“ (engl. *behavioral adaptation*, Martens & Janssen, 2012; OECD, 1990), d.h. nicht intendierte Änderungen des Verhaltens von Verkehrsteilnehmern im Zuge der Einführung von Sicherheitsmaßnahmen im Straßenverkehr, wurden bereits mehrfach für verschiedene Assistenzsysteme nachgewiesen (de Winter, Happee, Martens & Stanton, 2014; Dragutinovic, Brookhuis, Hagenzieker & Marchau, 2005; Rudin-Brown & Parker, 2004), unter anderem auch für vorrausschauende Warnsysteme (Naujoks & Totzke, 2014).

Als weitere Erklärung ist ein Ablenkungseffekt aufgrund der visuell-auditiven Informationsdarbietung denkbar. Die Interpretation der Anzeige von Art und Richtung des Konfliktpartners könnte die Aufmerksamkeit der Fahrer zu stark beansprucht haben, so dass die Reaktion auf den Konflikt gegenüber der nicht-assistierten Fahrt möglicherweise verzögert wird (siehe bspw. Wege et al., 2013). Eine Klärung, ob es sich um einen Ablenkungseffekt durch die Komplexität der dargebotenen Anzeige handelt, ist im Rahmen dieser Studie nicht möglich, wird jedoch in der Folgestudie (Studie II) angestrebt.

#### 4.4.5 Einschränkungen

An dieser Stelle sind mehrere methodische und inhaltliche Einschränkungen der Studie zu nennen<sup>16</sup>. Aussagen zu Szenarien, in denen die Fahrerinformationen in den Bedingungen mit später Informationsdarbietung bei einigen Probanden nicht ausgelöst wurde, sind mit Vorsicht zu interpretieren, da sie nur auf einer geringen Fallzahl basieren. Insgesamt ist der Ausschluss von Probanden, die bereits frühzeitig in der Anfahrt an die Konfliktsituation bremsen und deswegen die Fahrerinformation nicht auslösten, aus der Auswertung diskutabel. Möglicherweise werden durch dieses Vorgehen selektiv nur solche Probanden in die Auswertung eingeschlossen, die in den jeweiligen Situationen einen risikoreicheren Fahrstil wählen, was zu einer Verzerrung der Ergebnisse der späten Informationszeitpunkte

<sup>16</sup> Die hier genannten methodischen Kritikpunkte gelten grundsätzlich auch für die folgenden Studienteile II und III.

führen würde (d.h. die Informationszeitpunkte werden deswegen kritischer bewertet, da sie nur von Probanden ausgelöst werden, die sich mit einer höheren Geschwindigkeit als die übrigen Probanden an die jeweiligen Konfliktpunkte annähern). Andererseits kann eine Beurteilung des Fahrverhaltens bei späten Informationszeitpunkten nur auf solchen Probanden basieren, welche die Informationen auch tatsächlich erhalten haben.

Ein weiterer methodischer Kritikpunkt ergibt sich aus der ungleichen Häufigkeit der Prüfsituationen. Da manche Probanden die Fahrerinformationen bei späten Informationszeitpunkten nicht auslösten, bekamen nicht alle Probanden die Fahrerinformationen gleich häufig dargeboten. Diese ungleiche Exposition könnte womöglich die Reaktion der Probanden beeinflusst haben. Gleichwohl ist die Unterdrückung der Fahrerinformation im Fall eines ausreichend starken Bremseneingriffs aus Probandensicht und im Hinblick auf die Versuchsziele (d.h. die Evaluation der unterschiedlichen Informationszeitpunkte) notwendig: Werden die Informationen nicht unterdrückt, werden sie möglicherweise als falsche Alarme interpretiert, was wiederum zu Einschränkungen in der Fahrerreaktion und in der Beurteilung der Nützlichkeit der Fahrerunterstützung führen könnte (z.B. Cotté et al., 2001; Lee & See, 2004; Lees & Lee, 2007).

In Bezug auf das gewählte Evaluationskriterium (Anteil kritischer Begegnungen mit  $TTC_{min}/TTA_{min} < 1$  s) ist kritisch anzumerken, dass das gewählte Vorgehen eine Reduktion der verfügbaren Information von ursprünglich stetig erhobenen  $TTC_{min}/TTA_{min}$ -Werten auf eine Dichotomisierung in kritische ( $TTC_{min}/TTA_{min} < 1$  s) und unkritische ( $TTC_{min}/TTA_{min} \geq 1$  s) Situationen zur Folge hatte. Einerseits gehen hierdurch Informationen über die Verteilung der Werte – insbesondere Informationen über die Veränderungen der Verteilung durch die Fahrerinformationen – verloren. Andererseits verringert das Vorgehen die Teststärke der inferenzstatistischen Verfahren. Der Grund für das Vorgehen liegt darin, dass eine inferenzstatistische Analyse der Situationskritikalität auf Basis der stetigen Variablen  $TTC_{min}/TTA_{min}$  aufgrund der starken Streuung dieses Parameters und insbesondere durch Ausreißer-Werte nicht möglich gewesen wäre.

Aus inhaltlichen Gesichtspunkten ist vor allem zu betonen, dass das ermittelte Informationszeitfenster für die in dieser Studie implementierte Mensch-Maschine-Schnittstelle, bestehend aus einer unaufdringlichen, visuell-auditiven Fahrerinformation mit Darbietung der visuellen Anzeigeelemente im HUD, gilt. Eine Generalisierung der Ergebnisse auf andere Konfigurationen (z.B. Anzeige im Kombiinstrument, rein visuelle Anzeige, rein auditives Signal) ist insofern problematisch, da eine diesbezügliche Veränderung auch die Reaktion auf die Anzeigen verändern könnte. So kann davon ausgegangen werden, dass ein intensiveres Signal (bspw. ein dringlicheres auditives Signal), wie es etwa bei einer dringlichen Warnung Anwendung finden würde, auch bei späteren Darbietungszeitpunkten noch Wirkung zeigen würde. Weiterhin schränkt die Komplexität der visuellen Anzeigeelemente möglicherweise die Generalisierbarkeit der Ergebnisse ein. In dieser Studie wurde eine komplexe, richtungs- und konfliktspezifische Anzeigestrategie gewählt. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf weniger komplexe Anzeigestrategien oder auch auf noch komplexere Anzeigeelemente ist fraglich.

#### 4.4.6 Schlussfolgerungen

Ein Informationszeitfenster von einer bis zwei Sekunden vor dem letztmöglichen Warnzeitpunkt erscheint vor dem Hintergrund der Versuchsergebnisse als angemessen. Aus den Ergebnissen resultiert jedoch auch, dass die Spezifität der dargebotenen Anzeigen weiter zu untersuchen ist. Die verwendeten Anzeigen beinhalteten sowohl die Art des Konfliktpartners als auch die Richtung, aus welcher ein Konflikt droht. Diese komplexe Anzeige führte möglicherweise zu einer Ablenkung der Fahrer und letztlich zu einer Steigerung der Kritikalität bei spätem Informationszeitpunkt. Aus diesem Grund werden die Auswirkungen der Spezifität der Anzeige in der nächsten Studie ausführlich untersucht.

## 5 Studie II: Spezifität von Fahrerinformationen

### 5.1 Fragestellung

Urbane Verkehrsszenarien sind dadurch gekennzeichnet, dass vom Fahrer mehrere mögliche Konfliktorte gleichzeitig überwacht werden müssen. So sind beispielsweise bei der Überquerung von Kreuzungen Konflikte mit mehreren Verkehrsteilnehmern möglich, wenn diese sich jeweils aus einem der Kreuzungsarme an die Kreuzung annähern. Gleichzeitig könnten Fußgänger, welche die Straße queren, eine Reaktion des Fahrers jederzeit notwendig machen. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, ob spezifische Hinweise auf den erwarteten Konfliktort oder auf den jeweiligen Konfliktpartner die Wirksamkeit der untersuchten Fahrerinformationen steigern können, wie Grundlagenstudien zum *spatial cueing* Paradigma nahelegen (Kingstone, 1992; Posner, 1980; Posner et al., 1978).

In einer zweiten Studie wurde die Frage der Spezifität von Fahrerinformationen, d.h. wie spezifisch Fahrer über bevorstehende Konfliktsituationen zu informieren sind, in den Studienmittelpunkt gerückt. Zwar ist es möglich, aus Richtlinien und Gestaltungsempfehlungen einen Nutzen spezifischer Anzeigestrategien gegenüber bloßen Anzeigen, dass eine Konfliktsituation vorliegt, abzuleiten. Jedoch liegen gerade in Bezug auf frühzeitige Fahrerinformationen zu diesem Gestaltungskriterium bisher nur wenige empirische Arbeiten mit gemischten Ergebnissen vor (siehe Kapitel 3.2 für eine ausführliche Darstellung). Eine Wirksamkeitssteigerung von Fahrerwarnungen durch die **Anzeige des Konfliktpartners** (PKW, Radfahrer oder Fußgänger) wurde bislang zwar auf subjektiver Ebene (Totzke & Volk, 2013), nicht aber auf der Ebene des Fahrverhaltens gezeigt (z.B. Cummings et al., 2007; Thoma et al., 2009; Zarife, 2014). Im Hinblick auf **die Anzeige der Konfliktichtung** liegen gemischte Ergebnisse vor: So finden sich sowohl Studien, die Hinweise auf eine schnellere Fahrerreaktion auf richtungsspezifische Signale liefern (Weller et al., 2014; Zarife, 2014; Zhang et al., 2014) als auch Studien, die keine Vorteile solcher Signale zeigen (Bliss & Acton, 2003; Fricke, 2009; Yan et al., 2014). Insbesondere die Kombination aus richtungs- und konfliktspezifischen Hinweisen auf drohende Verkehrskonflikte wurde bisher kaum systematisch untersucht (für eine diesbezügliche Studie siehe Zarife, 2014). Vorstellbar ist, dass die Anzeige des Konfliktpartners aus Fahrersicht nur dann einen Vorteil bringt, wenn sie mit einer Richtungsanzeige kombiniert wird (Kingstone, 1992). Andererseits könnten komplexe Anzeige-Konzepte (im Vergleich zur bloßen Anzeige, dass ein Konflikt droht) in zeitkritischen Situationen möglicherweise eine Ablenkung der Fahrer nach sich ziehen, wie die Ergebnisse bei Informationsdarbietung zum letztmöglichen Warnzeitpunkt in Studie I nahe legen.

Die Probanden wurden deshalb in einer weiteren Studie im Fahrsimulator mit mehreren zeitkritischen Konfliktsituationen konfrontiert und mit Fahrerinformationen von unterschiedlicher Richtungs- und Konfliktspezifität unterstützt, um deren Auswirkungen auf objektiver (Häufigkeit kritischer Situationen, Time-to-arrival bei Bremsbeginn, maximale Bremspedalstellung) und subjektiver Ebene (Einschätzung der Nützlichkeit und Einfachheit der Benutzung) zu untersuchen. Neben dieser Hauptfragestellung wurde in einer Auswahl an Experimental-Situationen zusätzlich der Zeitpunkt der Informationsdarbietung in zwei Stufen variiert. Der Versuch hatte insgesamt vier unabhängige Variablen: Versuchsszenario („Auffahren in einer Kolonne“, „Abbiegender PKW“, „Kreuzender PKW“, „Überschreitender Fußgänger“, „Kreuzender Radfahrer“ und „Rechtsabbiegen – querender Radfahrer“), Richtungspezifität der Fahrerinformation (richtungsspezifisch vs. richtungsunspezifisch), Konfliktspezifität der Fahrerinformation (konfliktspezifisch vs. konfliktunspezifisch) und Zeitpunkt der Informationsdarbietung ( $t_0$  vs.  $t_{0+2s}$ ). Ziel der Variation des Zeitpunkts war es zu klären, inwieweit sich bei späten Fahrerinformationen ( $t_0$ ) tatsächlich ein Ablenkungseffekt durch komplexe Anzeige-Strategien findet, der bei der vorangegangenen Studie vermutet wurde. Außerdem sollte anhand der zusätzlichen Varianten der Prüfszenarien untersucht werden, ob potentiell positive Effekte der Spezifität der Informationen vom Informationszeitpunkt abhängen.

## 5.2 Methodik

### 5.2.1 Versuchsumgebung und Mensch-Maschine-Schnittstelle

Im zweiten Studienteil wurde dieselbe Versuchsumgebung (statischer Fahrsimulator, siehe Abschnitt 4.2.1 für eine detaillierte Beschreibung) und dieselbe Anzeigestrategie gewählt (visuell-auditive Fahrerinformationen im simulierten Head-Up Display; 500 Hz Sinus mit ansteigendem und fallendem Gradient für 500ms; siehe Abschnitt 4.2.2 für eine detaillierte Beschreibung) wie in Studie I.

### 5.2.2 Versuchsdesign

Für den Versuch wurde ein vollständig abhängiges Versuchsdesign gewählt. Die Spezifität der Fahrerinformationen wurde auf zwei Dimensionen variiert ( $UV_1$ : Richtungsspezifität,  $UV_2$ : Konfliktspezifität). Zusätzlich wurde der Informationszeitpunkt variiert ( $UV_3$ : Zeitpunkt der Informationsdarbietung).

#### 5.2.2.1 Spezifität

Am zweiten Versuch nahmen  $N = 21$  Probanden teil. Die Fahrer wurden durch eine visuell-auditive Fahrerunterstützung über die drohende Konfliktsituation informiert. Die visuelle Komponente der Fahrerunterstützung variierte in ihrer Konflikt- und Richtungsspezifität (siehe Tabelle 16):

- **Richtungunspezifisch-konfliktunspezifische Information** (im Folgenden „R-K-“ abgekürzt): Der Fahrer wird lediglich über das Vorliegen eines Konflikts informiert.
- **Richtungunspezifisch-konfliktspezifische Information** (im Folgenden „R-K+“ abgekürzt): Der Fahrer wird über die Art des Konfliktpartners (PKW, Radfahrer oder Fußgänger), nicht aber über die Richtung des Konflikts informiert.
- **Richtungspezifisch-konfliktunspezifische Information** (im Folgenden „R+K-“ abgekürzt): Der Fahrer wird über die Richtung des Konflikts informiert, nicht aber über die Art des Konfliktpartners.
- **Richtungspezifisch-konfliktspezifische Information** (im Folgenden „R+K+“ abgekürzt): Der Fahrer wird über die Art des Konfliktpartners (PKW, Radfahrer oder Fußgänger) und Richtung des Konflikts informiert.

Tabelle 16: Untersuchte Varianten der Mensch-Maschine-Schnittstelle. Die Varianten unterscheiden sich in ihrer Konflikt- (Anzeige des jeweiligen Konfliktpartners) und Richtungsspezifität (Anzeige der Richtung, aus welcher der Konflikt droht).

		Konfliktspezifität	
		konfliktunspezifisch	konfliktspezifisch
Richtungs-spezifität	richtungsun-spezifisch		
	richtungsspezifisch		

### 5.2.2.2 Szenarien

Es wurden insgesamt sechs Szenarien als Prüfsituationen ausgewählt (siehe Tabelle 17). Die Situationen wurden von den Probanden innerhalb einer innerstädtischen Strecke durchfahren:

- **Auffahren in einer Kolonne:** Plötzliches Abbremsen des Vorderfahrzeugs während einer Folgefahrt; im Gegensatz zur ersten Studie fand das Ereignis auf einem innerstädtischen Streckenabschnitt statt
- **Abbiegender PKW:** Entgegenkommender PKW nimmt dem Probanden an einer Kreuzung die Vorfahrt
- **Kreuzender PKW:** Kreuzender PKW nimmt dem Probanden an einer Kreuzung die Vorfahrt
- **Überschreiten:** Fußgänger tritt zwischen parkenden Fahrzeugen hervor und überquert die Straße
- **Kreuzender Radfahrer:** Radfahrer nimmt die Vorfahrt des Probanden an einer Kreuzung
- **Rechtsabbiegen – querender Radfahrer (entgegenkommend):** Beim Abbiegen kommt dem Probanden ein Radfahrer auf einem Radweg entgegen

Als Prüfzszenarien wurden aus einer vorangegangenen Studie diejenigen Szenarien ausgewählt, bei denen ein fahrerseitiger Unterstützungsbedarf nachgewiesen werden konnte (Naujoks, Grattenthaler & Neukum, 2014). Weiterhin wurde bei der Szenarienauswahl darauf geachtet, dass sowohl Szenarien mit Konfliktsituationen im Längsverkehr („Auffahren in einer Kolonne“; „Überschreiten“), als auch solche im Abbiege- („Abbiegender PKW“; „Rechtsabbiegender PKW – querender Radfahrer (entgegenkommend)“) und Querverkehr („Kreuzender PKW“; „Kreuzender Radfahrer“) in der Auswahl enthalten sind. Die Szenarien wurden in einem vollständig abhängigen Versuchsplan absolviert. Um Erwartungseffekten entgegenzuwirken, absolvierten die Probanden zusätzliche Füllsituationen, in denen es zu keiner Konfliktsituation kam. Das Verhältnis aus Füll- und Prüfsituationen lag wie in der ersten Studie bei 1:1.

Tabelle 17: Verwendete Szenarien und untersuchte Varianten der Mensch-Maschine-Schnittstelle. Der unterstützte Fahrer ist in den Abbildungen als rotes Fahrzeug dargestellt, der jeweilige Konfliktpartner in blau.

Situation	Richtungsspezifität				
	nein		ja		
	Konfliktspezifität				
	nein	ja	nein	ja	
Auffahren in einer Kolonne					
Abbiegender PKW					
Kreuzender PKW					
Überschreiten					
Kreuzender Radfahrer					
Rechtsabbiegen – querender Radfahrer (entgegenkommend)					

### 5.2.2.3 Zeitpunkte

In allen Szenarien wurde ein Informationszeitpunkt von zwei Sekunden vor dem letztmöglichen Warnzeitpunkt ( $t_{0+2s}$ ) verwendet. Zusätzlich wurde in der Hälfte der Szenarien („Abbiegender PKW“, „Überschreiten“ und „Kreuzender Radfahrer“) ein zweiter Informationszeitpunkt ( $t_0$ ) untersucht, d.h. die Probanden wurden zum letztmöglichen Warnzeitpunkt  $t_0$  vor dem drohenden Konflikt informiert (siehe Tabelle 18). Die Beschränkung auf drei Versuchsszenarien mit Variation des Informationszeitpunkts ist der Versuchszeit geschuldet: Eine diesbezügliche Variation in allen Szenarien hätte die Versuchszeit zu stark verlängert, so dass Ermüdungs- oder Übelkeits-Effekte nicht auszuschließen gewesen wären.

Die Auswahl der beiden Zeitpunkte basierte auf Studie I: Zum Zeitpunkt  $t_{0+2s}$  konnte in der ersten Studie eine deutliche Konfliktentschärfung gegenüber der nicht-assistierten Fahrt nachgewiesen werden, während Informationen zu  $t_0$  die Kritikalität in manchen Szenarien sogar steigerten (siehe Kapitel 4.3.3). Durch die zusätzliche Untersuchung des letztmöglichen Warnzeitpunkts soll in dieser Studie geklärt werden, ob dies möglicherweise auf einen Ablenkungseffekt durch zu komplexe Anzeigeelemente zurückzuführen ist.

Tabelle 18: Untersuchte Informationszeitpunkte und Szenarien. Jedes Szenario wurde von den Probanden vier Mal (mit den unterschiedlichen Bedingungen der Informationsspezifität) durchfahren.

Szenario	Informationszeitpunkt	
	$t_0$	$t_{0+2s}$
Auffahren in einer Kolonne		X
Abbiegender PKW	X	X
Kreuzender PKW		X
Überschreiten	X	X
Kreuzender Radfahrer	X	X
Rechtsabbiegen – querender Radfahrer (entgegen kommend)		X

Die Prüfsituationen wurden in permutierter Reihenfolge durchfahren. Hierfür wurden vier zufällige Versuchsreihenfolgen erstellt, in denen die Versuchsszenarien absolviert wurden. Abfolgen mit demselben Szenario hintereinander waren nicht zugelassen. Die Probanden wurden den Versuchsreihenfolgen per Zufall zugewiesen. Auf diese Weise können Übungseffekte der Versuchsreihenfolge kontrolliert werden.

### 5.2.3 Häufigkeit der Informationsdarbietung

Wie aus Tabelle 19 hervorgeht, unterschritten die meisten Fahrer die TTA-Schwelle zur Darbietung der Fahrerinformationen zum frühen Informationszeitpunkt  $t_{0+2s}$ . Bei späten Fahrerinformationen ( $t_0$ ) hingegen wurden die Fahrerinformationen teilweise nicht mehr ausgelöst. Vor allem im Szenario „Überschreitender Fußgänger“ wurde die Fahrerinformation nur bei etwa der Hälfte der Fahrer ausgelöst. Die restlichen Fahrer bremsen in diesem Szenario so frühzeitig in der Anfahrt an den Konfliktpunkt, dass die Darbietung der Fahrerinformation unterdrückt wurde. Da nur solche Probanden, die auch eine Fahrerunterstützung erhalten hatten, in die Ergebnisdarstellung einbezogen werden, wurde das Szenario „Überschreitender Fußgänger“ bei der inferenzstatistischen Analyse des Informationszeitpunkts  $t_0$  ausgeschlossen, da andernfalls aufgrund des Messwiederholungsdesigns ca. die Hälfte der Fälle nicht in die Analyse eingehen würde. Aufgrund eines Fehlers in der Datenaufzeichnung konnten außerdem die objektiven Daten des Szenarios „Auffahren in einer Kolonne“ nicht bestimmt werden. Dieses Szenario wurde folglich ebenfalls aus der Auswertung ausgeschlossen.

Tabelle 19: Anzahl Aktivierungen der Fahrerunterstützung. Grau hinterlegte Zellen werden aufgrund geringer Zellbesetzung (Überschreiten) oder fehlerhafter Datenaufzeichnung (Auffahren in einer Kolonne) nicht in die Analyse aufgenommen.

Szenario	Infozeitpunkt $t_0$				Infozeitpunkt $t_{0+2s}$			
	R-K-	R-K+	R+K-	R+K+	R-K-	R-K+	R+K-	R+K+
Auffahren in einer Kolonne					21	20	21	21
Abbiegender PKW	20	17	18	19	21	21	21	21
Kreuzender PKW					21	21	21	21
Überschreiten	11	14	12	11	21	20	21	21
Kreuzender Radfahrer	20	20	21	19	21	21	21	21
Rechtsabbiegen – querender Radfahrer					21	21	20	21

### 5.2.4 Abhängige Variablen

Es wurden dieselben objektiven Parameter der Kritikalität und Bremsreaktion erhoben wie in Studie I (für eine Beschreibung, siehe Tabelle 20, bzw. Abschnitt 4.2.6). Die Probanden wurden direkt nach den Prüfsituationen vom Versuchsleiter zur Situationskritikalität und Nützlichkeit der dargebotenen Fahrerinformation befragt (siehe Abschnitt „Fahrtbefragung“ in Tabelle 21, bzw. Abschnitt 4.2.6).

Tabelle 20: Übersicht objektiver Variablen.

Objektive Parameter	Beschreibung	Einheit
<b>Häufigkeit kritischer Situationen</b>		
Anteil kritischer Begegnungen	Unterschreitung des $TTA_{\min}$ / $TTC_{\min}$ -Schwellenwerts von 1s	[% Fahrten]
<b>Bremsreaktion</b>		
TTA bei Bremsbeginn	Zeitabstand zum Konfliktpunkt bei Einleitung des Bremsmanövers	[s]
Maximale Bremspedalstellung	Maximale Betätigung des Bremspedals beim Abbremsen	[% der maximalen Bremspedalstellung]

Nach der Fahrt wurde eine Nachbefragung zu Aspekten der Nützlichkeit („*Usefulness*“) und Leichtigkeit der Benutzung („*Ease of Use*“) der verschiedenen Varianten der Mensch-Maschine-Schnittstelle durchgeführt (siehe Abschnitt „Nachbefragung“ in Tabelle 21). Basis für diese Befragung ist das sogenannte *Technology-Acceptance-Model* nach Davis (Davis 1989; siehe Abbildung 29). Nach diesem Modell wird die Nutzung einer Technologie durch eine Verhaltensintention (d.h. den Entschluss, die Technologie in definierten Situationen zu nutzen) bestimmt. Diese wiederum wird durch die Einstellung des Nutzers gegenüber der Technologie bedingt. Motiviert wird diese Einstellung durch die erlebte Nützlichkeit („*Usefulness*“) bzw. die erlebte Leichtigkeit der Benutzung („*Ease of Use*“) im Umgang mit der jeweiligen Technologie.

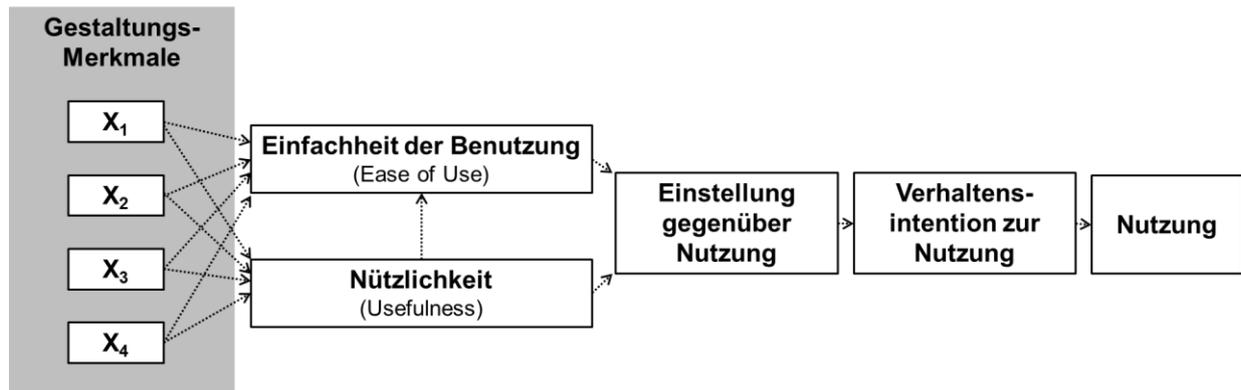


Abbildung 29: Technologie-Akzeptanz-Modell nach Davis (Davis, 1986).

Ein standardisierter Fragebogen zur Erfassung dieser beiden Konstrukte liegt für den Bereich der Fahrerassistenz nicht vor. Die Fragebogen-Items zur Erfassung der Nützlichkeit und Leichtigkeit der Benutzung wurden deshalb in Anlehnung an verfügbare Fragebögen, die sich vor allem auf Software-Anwendungen bei Bildschirmarbeitsplätzen beziehen, erstellt (Böhm, Fuchs, Pfliegl & Kölbl, 2009; Davis, 1989; Venkatesh, Morris, Davis & Davis, 2003; siehe Abschnitt „Nachbefragung“ in Tabelle 21).

Tabelle 21: Übersicht subjektiver Variablen.

Subjektive Angaben	Frage	Skala
<b>Fahrtbefragung</b>		
Situationskritikalität	Wir kritisch war die Situation?	0-10, Situationsbeurteilungsskala (Neukum et al., 2008)
Nützlichkeit	Wie hilfreich war die Information?	1-15, Zusatzkategorie 0 (KU-Skala)
<b>Nachbefragung</b>		
	<b>Item</b>	
Leichtigkeit der Benutzung („Ease of Use“)	Die Information war leicht verständlich. Die Information war ausreichend. Das Lesen der Information war anstrengend. Die Information hat vom Fahren abgelenkt.	5-stufig (trifft nicht zu – trifft zu)
Nützlichkeit („Usefulness“)	Die Information war hilfreich. Durch die Information habe ich Konflikte schneller erkannt. Durch die Information wurde das Fahren sicherer. Das System wird im Alltag Unfälle verringern.	5-stufig (trifft nicht zu – trifft zu)

### 5.2.5 Stichprobe

Es nahmen  $N = 21$  Fahrer (7 weiblich und 14 männlich) aus dem Fahrerpanel der WIVW GmbH an der Untersuchung teil. Alle Fahrer hatten vor der Untersuchung an einem ausführlichen Fahrertraining teilgenommen. Die Fahrer waren zum Zeitpunkt der Untersuchung im Mittel 32 Jahre alt ( $SD = 7$  Jahre,  $MIN = 24$  Jahre,  $MAX = 50$  Jahre) und hatten eine mittlere Fahrpraxis von 13 Jahren ( $SD = 7$  Jahre,  $MIN = 6$  Jahre,  $MAX = 32$  Jahre). Im Durchschnitt hatten die Fahrer im abgelaufenen Jahr eine Fahrleistung von 16100 km ( $SD = 12946$  km,  $MIN = 2000$  km,  $MAX = 60000$  km). Die Fahrer hatten zuvor weder an Studie I, noch an einer anderen Studie mit vergleichbarem Inhalt teilgenommen.

## 5.2.6 Versuchsablauf

Nach der Begrüßung durch den Versuchsleiter wurden die Probanden zunächst über ihre Fahraufgabe instruiert. Diese bestand wie in der ersten Studie darin, die Strecken zügig und unter Beachtung der Straßenverkehrsordnung zu durchfahren. Außerdem wurden die Probanden informiert, dass sie durch ein neuartiges Assistenzsystem unterstützt werden würden. Zur Eingewöhnung folgte eine kurze Stadtstrecke, bei der die Fahrer die vier verschiedenen Varianten der Mensch-Maschine-Schnittstelle (R-K-, R-K+, R+K-, R+K+) anhand eines unkritischen Szenarios kennenlernen konnten, ohne dass sie eine Erklärung zu den verschiedenen Varianten erhielten. Dieses Szenario wurde im anschließenden Hauptversuch nicht mehr verwendet. Auf diese Weise können Effekte, die auf die erstmalige Auslösung der Fahrerinformation zurückgehen, im Hauptversuch kontrolliert werden.

Im Anschluss erfolgte die Durchführung des Hauptversuchs. Hierbei wurden die Prüfsituationen in den vier oben beschriebenen Reihenfolgen durchfahren, denen die Fahrer per Zufall zugewiesen wurden. Da mit  $N = 21$  eine ungerade Probandanzahl teilnahm, wurden drei Reihenfolgen von jeweils fünf Fahrern durchfahren, während eine Reihenfolge von sechs Fahrern durchfahren wurde. Nach der Fahrt wurde die Nachbefragung durchgeführt.

## 5.3 Ergebnisse

### 5.3.1 Vorgehen bei der Ergebnisdarstellung

Der folgende Ergebnisteil behandelt die Frage, wie spezifisch frühzeitige Fahrerinformationen gestaltet werden sollten, um einen positiven Effekt auf Fahrverhalten und Akzeptanz zu erreichen. Betrachtet werden zunächst alle Szenarien, die mit Fahrerunterstützung zu  $t_{0+2s}$  durchfahren wurden. Zur zufallskritischen Prüfung der Effekte auf die abhängigen Variablen werden univariate Varianzanalysen mit den Messwiederholungs-Faktoren „Szenario“, „Konfliktspezifität“ und „Richtungsspezifität“ durchgeführt. Analog zum ersten Studienteil werden die Verkehrssituationen jeweils in „kritische“ ( $TTA_{\min} < 1s$ ) oder „unkritische“ ( $TTA_{\min} \geq 1s$ ) Situationen eingeteilt und eine logistische Regression mit den Prädiktoren „Szenario“, „Konfliktspezifität“ und „Richtungsspezifität“ realisiert (siehe Abschnitt 4.2.6 für eine ausführliche Begründung der Dichotomisierung der stetigen Variable  $TTA_{\min}$ ). Signifikante Haupteffekte des Versuchsszenarios werden hierbei zwar berichtet, aber nicht ausgeführt, da diese einerseits aufgrund der Unterschiedlichkeit der Fahrmanöver und Situationen zu erwarten sind und andererseits – im Gegensatz zu Interaktionen aus Spezifität und Szenario – für die vorliegende Fragestellung nicht von Bedeutung sind. Im Anschluss werden die Ergebnisse der Nachbefragung dargestellt. Auch hier werden univariate Varianzanalysen mit den Messwiederholungsfaktoren „Konfliktspezifität“ und „Richtungsspezifität“ durchgeführt, um deren Effekte auf die Nachbefragungsurteile inferenzstatistisch zu prüfen.

Die Ergebnisse der Szenarien, die sowohl mit Fahrerunterstützung zu  $t_0$  als auch zu  $t_{0+2s}$  durchfahren wurden, werden nachfolgend in einem gesonderten Abschnitt berichtet. Dabei wird der Einfluss von Informationszeitpunkt und -spezifität in drohenden Konfliktsituationen untersucht. Der zusätzliche Faktor „Informationszeitpunkt“ wird hierfür in die inferenzstatistischen Verfahren mit aufgenommen (ANOVA/logistische Regression mit den Faktoren „Szenario“, „Informationszeitpunkt“, „Konfliktspezifität“ und „Richtungsspezifität“). Abschließend findet sich eine Zusammenfassung der Ergebnisse.

## 5.3.2 Hauptfragestellung: Einfluss Spezifität

### 5.3.2.1 Missings

Da ein Proband aufgrund überhöhter Geschwindigkeit die Situation „Überschreiten (R-K+)“ passierte, bevor der Fußgänger die Straße überquert hatte, können diese Daten folglich nicht in die Auswertung eingehen.

### 5.3.2.2 Kritikalität

Abbildung 30 stellt den Anteil kritischer Begegnungen über alle untersuchten Szenarien dar. Wie aus der Abbildung hervorgeht, kommen kritische Begegnungen relativ selten vor (< 10% in allen Spezifitäts-Bedingungen). Weder die Spezifität der Fahrerinformationen noch die Art des Szenarios haben einen Einfluss auf den Anteil an kritischen Begegnungen (siehe Tabelle 22)

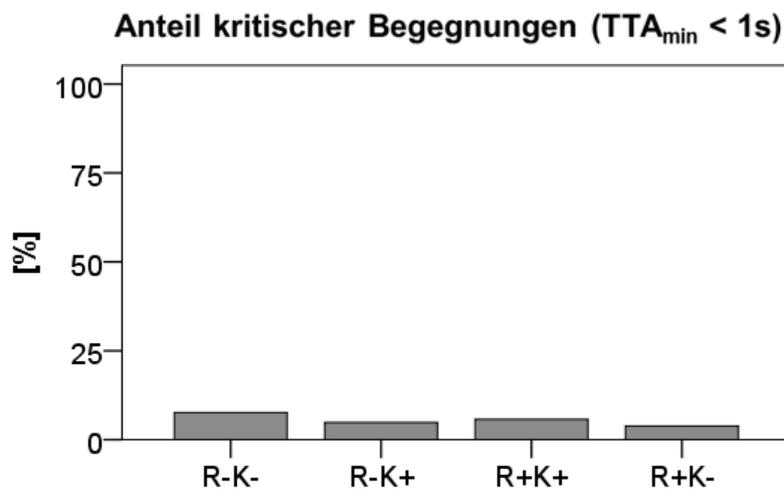


Abbildung 30: Anteil kritischer Begegnungen ( $TTA_{\min} < 1s$ ).

Tabelle 22: Logistische Regression; AV: Kritikalität (< 1 s vs.  $\geq 1$  s); UVn: Szenario, Konfliktspezifität, Richtungsspezifität, Interaktionen; Methode: Einschluss; Modelgüte:  $\chi^2 = 31.64$ ,  $df = 19$ ,  $p = .034$ .

Prädiktor	B	Wald	df	p	OR
Konfliktspezifität	-	0.00	1	1.000	-
Richtungsspezifität	-	0.00	1	1.000	-
Szenario	-	1.77	4	.779	-
Konfliktspezifität * Richtungsspezifität	-	0.15	1	.699	-
Konfliktspezifität * Szenario	-	0.41	4	.981	-
Richtungsspezifität * Szenario	-	0.03	4	1.000	-
Konfliktspezifität * Richtungsspezifität * Szenario	-	0.00	4	1.000	-

### 5.3.2.3 Fahrerreaktion

#### 5.3.2.3.1 Time-to-arrival bei Bremsbeginn

Die Probanden bremsen in den verschiedenen Assistenzbedingungen bei vergleichbar großem Zeitabstand zum Konfliktpunkt (siehe Abbildung 31 bzw. Tabelle 23). Es findet sich weder ein Haupteffekt der **Richtungsspezifität** noch der **Konfliktspezifität**. Tendenziell zeigen sich jedoch Unterschiede in der Auswirkung konfliktspezifischer Informationen auf

den Bremsbeginn in Abhängigkeit vom betrachteten Szenario (marginal signifikante **Interaktion aus Szenario und Konfliktspezifität**).

So beginnen die Probanden im Szenario „Abbiegender PKW“ bei konfliktunspezifischen Fahrerinformationen tendenziell bei größerem Abstand zum Konfliktpunkt mit dem Bremsen ( $M = 2.85$  s,  $SE = 0.07$ ) als bei konfliktspezifischen Informationen ( $M = 2.76$  ms,  $SE = 0.06$ ,  $F(1,20) = 3.28$ ,  $p = .085$ ,  $\eta^2 = 0.14$ ). Im Szenario „Kreuzender PKW“ findet sich hingegen ein entgegengesetzter Effekt, d.h. die Probanden beginnen bei konfliktunspezifischen Informationen bei geringerem Abstand mit dem Bremsen als bei konfliktspezifischen Informationen (konfliktspezifisch:  $M = 2.82$  s,  $SE = 0.07$ ; konfliktunspezifisch:  $M = 2.66$  s,  $SE = 0.07$ ,  $F(1,19) = 8.36$ ,  $p = .009$ ,  $\eta^2 = 0.31$ ). In den übrigen Szenarien findet sich kein vergleichbarer Effekt der Konfliktspezifität. Eine **Interaktion aus Richtungsspezifität und Szenario** zeigt sich ebenfalls nicht. Insgesamt variiert der Zeitabstand zum Konfliktpunkt bei Bremsbeginn zwischen den verschiedenen Szenarien (**Effekt Szenario**).

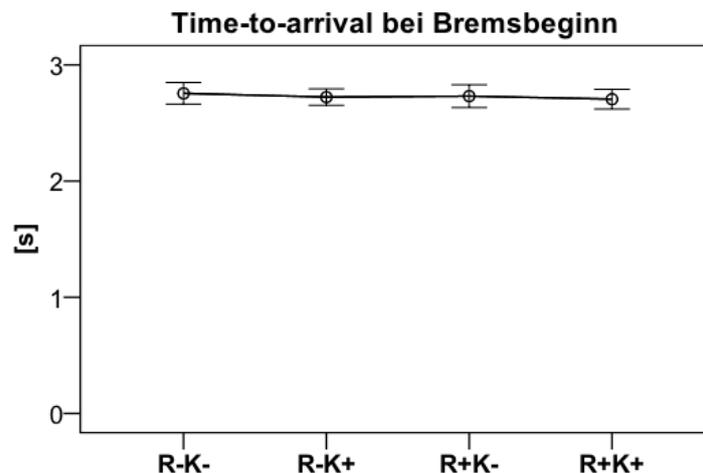


Abbildung 31: Time-to-arrival bei Bremsbeginn; dargestellt sind Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Tabelle 23: Time-to-arrival bei Bremsbeginn, ANOVA-Ergebnisse.

Effekt	F	df <sub>1</sub>	df <sub>2</sub>	p	$\eta^2$
Konfliktspezifität	0.13	1	17	.726	0.01
Richtungsspezifität	0.06	1	17	.817	0.00
Szenario	4.95	4	14	.011	0.59
Konfliktspezifität * Richtungsspezifität	1.09	1	17	.311	0.06
Konfliktspezifität * Szenario	2.57	4	14	.084	0.42
Richtungsspezifität * Szenario	0.54	4	14	.708	0.13
Konfliktspezifität * Richtungsspezifität * Szenario	0.18	4	14	.945	0.05

### 5.3.2.3.2 Maximale Bremspedalstellung

Die Fahrer reagieren durchschnittlich mit mittelstarken Bremsingriffen auf die Fahrerinformationen (siehe Abbildung 32). Im Mittel wird das Bremspedal (bis auf wenige Ausreißer) mit weniger als 20% der maximal möglichen Bremspedalstellung betätigt. Die maximale Bremspedalstellung ist weitestgehend unabhängig von der **Spezifität** der dargebotenen Fahrerinformationen. Es zeigt sich weder ein Haupteffekt der **Richtungsspezifität** noch der **Konfliktspezifität** auf die maximale Bremspedalstellung (siehe Tabelle 24).

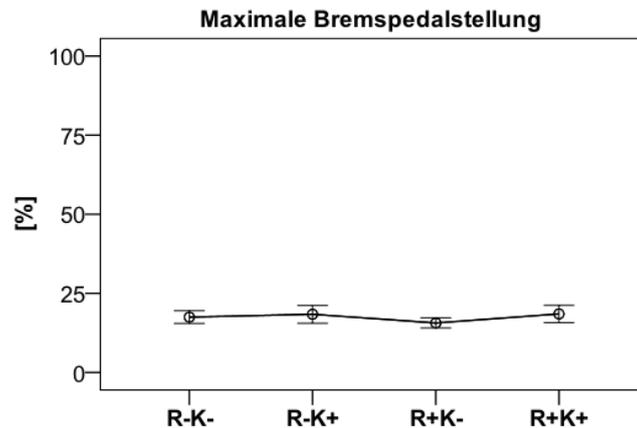


Abbildung 32: Maximale Bremspedalstellung; dargestellt sind Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Tabelle 24: Maximale Bremspedalstellung, ANOVA-Ergebnisse.

Effekt	F	df <sub>1</sub>	df <sub>2</sub>	p	$\eta^2$
Konfliktspezifität	0.29	1	17	.595	0.02
Richtungsspezifität	1.30	1	17	.270	0.07
Szenario	5.65	4	14	.006	0.62
Konfliktspezifität * Richtungsspezifität	4.09	1	17	.059	0.19
Konfliktspezifität * Szenario	1.34	4	14	.303	0.28
Richtungsspezifität * Szenario	1.22	4	14	.345	0.26
Konfliktspezifität * Richtungsspezifität * Szenario	0.65	4	14	.635	0.16

Jedoch findet sich eine marginal signifikante Interaktion aus **Konfliktspezifität** und **Richtungsspezifität**. Während die Konfliktspezifität die maximale Bremspedalstellung bei richtungsunspezifischen Informationen nicht beeinflusst, bremsen die Probanden bei konfliktspezifischen Informationen stärker, wenn diese ebenfalls richtungsspezifisch sind (R+K+:  $M = 17.33\%$ ,  $SE = 1.16$ ; R+K-:  $M = 15.88\%$ ,  $SE = 0.75$ , siehe Abbildung 32). Die Bremsstärke variiert wie auch die TTA bei Bremsbeginn je nach **Szenario**.

## 5.3.2.4 Urteile

### 5.3.2.4.1 Kritikalitätseinschätzung

Im Hinblick auf die Kritikalitätsurteile der Fahrer findet sich kein Einfluss der **Spezifität**. Weder **Konflikt-** noch **Richtungsspezifität** beeinflussen die Kritikalitätsurteile der Probanden (siehe Abbildung 33 bzw. Tabelle 25). Die Situationen werden durchschnittlich als „unangenehm“ ( $M = 4.74$ ,  $SE = 0.45$ ) beurteilt. Die Urteile der Situationskritikalität unterscheiden sich jedoch signifikant zwischen den Prüfsituationen (Effekt **Szenario**).

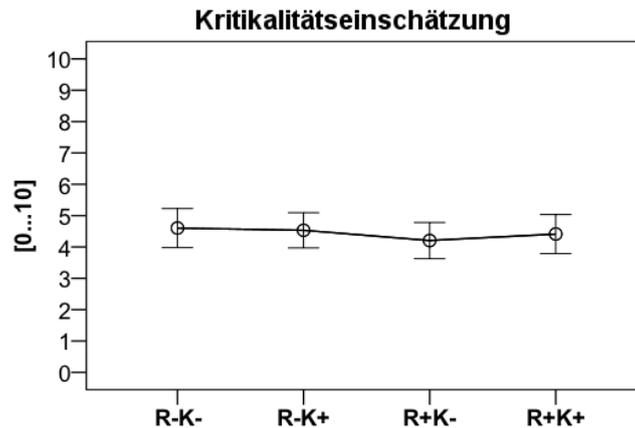


Abbildung 33: Kritikalitätseinschätzung; dargestellt sind Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Tabelle 25: Kritikalitätseinschätzung; ANOVA-Ergebnisse.

Effekt	F	df <sub>1</sub>	df <sub>2</sub>	p	$\eta^2$
Konfliktspezifität	0.41	1	17	.532	0.02
Richtungsspezifität	1.08	1	17	.314	0.06
Szenario	4.40	4	14	.016	0.56
Konfliktspezifität * Richtungsspezifität	0.23	1	17	.642	0.01
Konfliktspezifität * Szenario	1.41	4	14	.283	0.29
Richtungsspezifität * Szenario	0.33	4	14	.856	0.09
Konfliktspezifität * Richtungsspezifität * Szenario	1.54	4	14	.244	0.31

### 5.3.2.4.2 Nützlichkeitsurteilung

Abbildung 34 stellt die Nützlichkeitsurteile der Probanden dar. Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass die Probanden die Fahrerinformationen im Mittel als „hilfreich“ einschätzen. **Richtungsspezifische Informationen** ( $M = 11.43$  s,  $SE = 0.55$ ) werden unabhängig vom Versuchsszenario als hilfreicher eingeschätzt als richtungsunspezifische Informationen ( $M = 10.10$  s,  $SE = 0.54$ , Effekt **Richtungsspezifität**, siehe Tabelle 26). Ob die Art des jeweiligen Konfliktpartners angezeigt wird oder nicht, hat ebenfalls einen Einfluss auf die Nützlichkeitsurteile: **Konfliktspezifische Informationen** ( $M = 11.06$  s,  $SE = 0.52$ ) werden unabhängig vom Versuchsszenario als hilfreicher eingeschätzt als konfliktunspezifische Informationen ( $M = 10.47$  s,  $SE = 0.51$ , Effekt **Konfliktspezifität**, siehe Tabelle 26). Weiterhin hängt die eingeschätzte Nützlichkeitsurteile der Fahrerinformationen vom jeweiligen Szenario ab (Effekt **Szenario**).

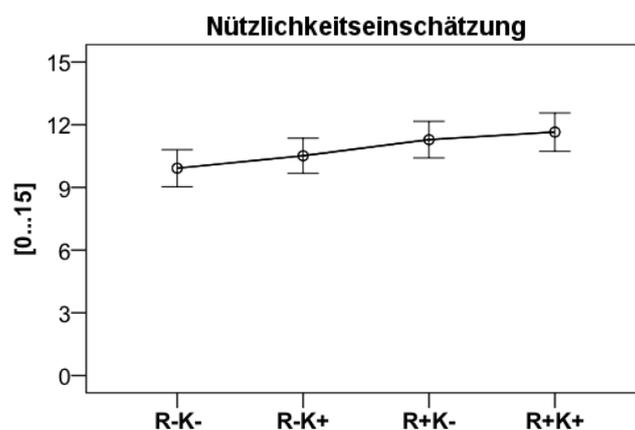


Abbildung 34: Nützlichkeitsurteilung; dargestellt sind Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Tabelle 26: Nützlichkeitseinschätzung; ANOVA-Ergebnisse.

Effekt	F	df <sub>1</sub>	df <sub>2</sub>	p	η <sup>2</sup>
Konfliktspezifität	5.09	1	17	.038	0.23
Richtungsspezifität	9.47	1	17	.007	0.36
Szenario	3.86	4	14	.026	0.52
Konfliktspezifität * Richtungsspezifität	0.01	1	17	.939	0.00
Konfliktspezifität * Szenario	1.48	4	14	.262	0.30
Richtungsspezifität * Szenario	0.58	4	14	.682	0.14
Konfliktspezifität * Richtungsspezifität * Szenario	1.49	4	14	.258	0.30

### 5.3.3 Nachbefragungsergebnisse

Abbildung 35 stellt die Nachbefragungsergebnisse dar. Hinsichtlich der **Leichtigkeit der Benutzung** („*Ease of Use*“) ergeben sich folgende Ergebnisse:

- „*Die Information war leicht verständlich*“: Die Fahrerinformationen werden durchschnittlich als leicht verständlich eingeschätzt ( $M = 4.13$ ,  $SE = 0.13$ ). Wird die Art des Konfliktpartners (PKW, Radfahrer oder Fußgänger) ohne eine Richtungsanzeige dargeboten, werden die Informationen am verständlichsten beurteilt (Interaktion **Konfliktspezifität\*Richtungsspezifität**, siehe Abbildung 35 und Tabelle 27).
- „*Die Information war ausreichend*“: Bei dieser Frage findet sich eine breite Streuung der Urteile. Sowohl die Anzeige der Konfliktrichtung (R-:  $M = 3.00$ ,  $SE = 0.22$ ; R+:  $M = 4.50$ ,  $SE = 0.15$ , Effekt **Richtungsspezifität**) als die Anzeige des Konfliktpartners (K-:  $M = 3.36$ ,  $SE = 0.19$ ; K+:  $M = 4.14$ ,  $SE = 0.17$ , Effekt **Konfliktspezifität**) erhöht die Zustimmung zu diesem Item. Am stärksten ist die Zustimmung bei richtungs- und gleichzeitig konfliktspezifischen Informationen ( $M = 4.71$ ,  $SE = 0.16$ , Interaktion **Konfliktspezifität\*Richtungsspezifität**).
- „*Das Lesen der Information war anstrengend*“: Die visuelle Zusatzbeanspruchung durch das Lesen der Anzeigeelemente wird insgesamt als moderat eingeschätzt ( $M = 1.96$ ,  $SE = 0.18$ ). Das Lesen richtungsspezifischer Informationen wird hierbei jedoch als anstrengender bewertet als das Lesen richtungsunspezifischer Informationen (R-:  $M = 1.57$ ,  $SE = 0.18$ ; R+:  $M = 2.36$ ,  $SE = 0.26$ , Effekt **Richtungsspezifität**). Die **Konfliktspezifität** der Anzeigen beeinflusst die Urteile bei diesem Item nicht.
- „*Die Information hat vom Fahren abgelenkt*“: Die Probanden schätzen die Ablenkung durch die Anzeigen im Mittel als eher gering ein ( $M = 2.10$ ,  $SE = 0.21$ ). Die Fahrer geben jedoch an, von konfliktspezifischen Informationen stärker abgelenkt gewesen zu sein als von konfliktunspezifischen Informationen (K-:  $M = 1.95$ ,  $SE = 0.18$ ; K+:  $M = 2.24$ ,  $SE = 0.24$ , Effekt **Konfliktspezifität**), wohingegen die Richtungsspezifität die Urteile diesbezüglich nicht beeinflusst (Effekt **Richtungsspezifität**).

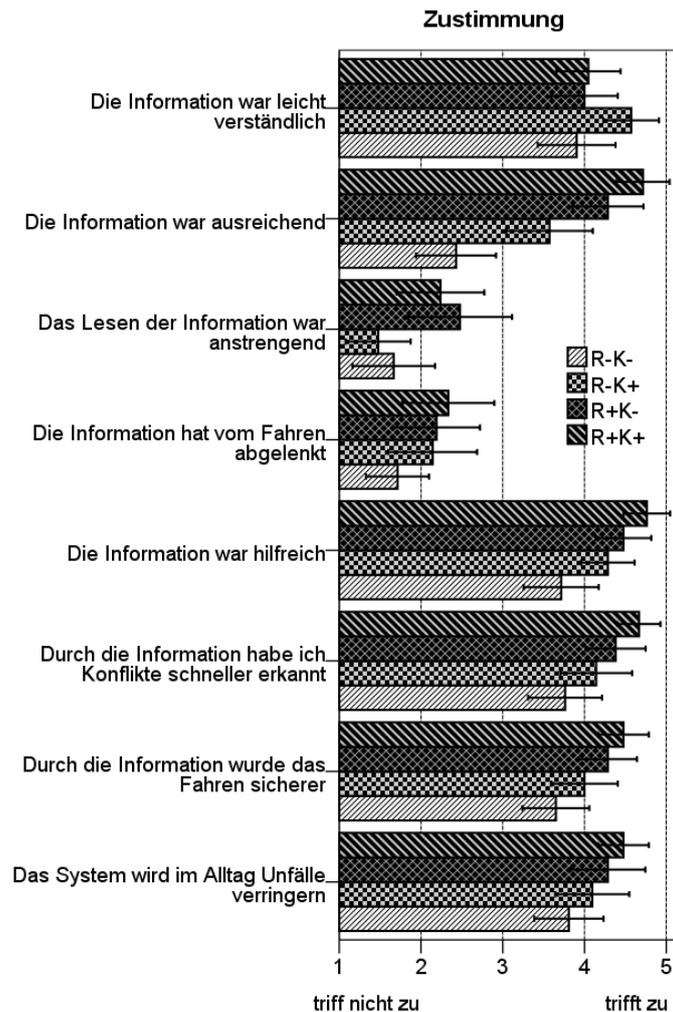


Abbildung 35: Nachbefragungsergebnisse, (R-K- = richtungsunspezifisch-konfliktunspezifisch, R-K+ = richtungsunspezifisch-konfliktspezifisch, R+K- = richtungsspezifisch-konfliktunspezifisch, R+K+ = richtungsspezifisch-konfliktspezifisch); dargestellt sind Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Die **Nützlichkeit** („Usefulness“) der Anzeigen wird insgesamt hoch eingeschätzt. Durch Konflikt- und Richtungsspezifität der Anzeigen nimmt die eingeschätzte Nützlichkeit gegenüber unspezifischen Anzeigen zu (siehe Tabelle 27). Dies folgt aus der durchschnittlich höheren Zustimmung bei spezifischen Anzeigen zu folgenden Aussagen (signifikante Haupteffekte **Richtungs-** und **Konfliktspezifität**):

- „Die Information war hilfreich.“ (**Konfliktspezifität**: K-:  $M = 4.10$ ,  $SE = 0.15$ ; K+:  $M = 4.52$ ,  $SE = 0.13$ ; **Richtungsspezifität**: R-:  $M = 4.00$ ,  $SE = 0.16$ ; R+:  $M = 4.62$ ,  $SE = 0.13$ );
- „Durch die Information habe ich Konflikte schneller erkannt.“ (**Konfliktspezifität**: K-:  $M = 4.07$ ,  $SE = 0.16$ ; K+:  $M = 4.41$ ,  $SE = 0.14$ ; **Richtungsspezifität**: R-:  $M = 3.95$ ,  $SE = 0.19$ ; R+:  $M = 4.52$ ,  $SE = 0.14$ );
- „Durch die Information wurde das Fahren sicherer.“ (**Konfliktspezifität**: K-:  $M = 3.95$ ,  $SE = 0.17$ ; K+:  $M = 4.20$ ,  $SE = 0.16$ ; **Richtungsspezifität**: R-:  $M = 3.80$ ,  $SE = 0.15$ ; R+:  $M = 4.35$ ,  $SE = 0.15$ );
- „Das System wird im Alltag Unfälle verringern.“ (**Konfliktspezifität**: K-:  $M = 4.05$ ,  $SE = 0.18$ ; K+:  $M = 4.29$ ,  $SE = 0.17$ ; **Richtungsspezifität**: R-:  $M = 3.95$ ,  $SE = 0.20$ ; R+:  $M = 4.38$ ,  $SE = 0.17$ );

Tabelle 27: Nachbefragung, ANOVA-Ergebnisse.

Dimension	Item	Effekt	F	df <sub>1</sub>	df <sub>2</sub>	p	η <sup>2</sup>
Leichtigkeit der Benutzung („Ease of Use“)	Die Information war leicht verständlich.	Konfliktspezifität	5.91	1	20	.025	.23
		Richtungsspezifität	1.03	1	20	.323	.05
		Interaktion	5.20	1	20	.034	.21
	Die Information war ausreichend.	Konfliktspezifität	24.04	1	20	<.001	.55
		Richtungsspezifität	60.97	1	20	<.001	.75
		Interaktion	6.64	1	20	.018	.25
	Das Lesen der Information war anstrengend.	Konfliktspezifität	1.08	1	20	.310	.05
		Richtungsspezifität	8.42	1	20	.009	.30
		Interaktion	.04	1	20	.853	.00
	Die Information hat vom Fahren abgelenkt.	Konfliktspezifität	12.31	1	20	.002	.38
		Richtungsspezifität	2.11	1	20	.162	.10
		Interaktion	2.79	1	20	.110	.12
Nützlichkeit („Usefulness“)	Die Information war hilfreich.	Konfliktspezifität	10.09	1	20	.005	.34
		Richtungsspezifität	12.93	1	20	.002	.39
		Interaktion	1.69	1	20	.208	.08
	Durch die Information habe ich Konflikte schneller erkannt.	Konfliktspezifität	10.00	1	20	.005	.33
		Richtungsspezifität	10.44	1	20	.004	.34
		Interaktion	0.14	1	20	.715	.01
	Durch die Information wurde das Fahren sicherer.	Konfliktspezifität	7.31	1	19 <sup>17</sup>	.014	.28
		Richtungsspezifität	17.82	1	19	<.001	.48
		Interaktion	0.21	1	19	.649	.01
	Das System wird im Alltag Unfälle verringern.	Konfliktspezifität	7.19	1	20	.014	.27
		Richtungsspezifität	6.63	1	20	.018	.25
		Interaktion	0.18	1	20	.680	.01

### 5.3.4 Zusätzliche Fragestellung: Einfluss Informationszeitpunkt

#### 5.3.4.1 Missings

In Fahrten mit Informationsdarbietung zum letztmöglichen Informationszeitpunkt reagierten manche Probanden nicht mit einer Bremsreaktion, so dass die TTA bei Bremsbeginn nicht bestimmt werden konnte:

- Ein Proband bremste bei zwei Durchfahrten der Situation „Abbiegender PKW“ nicht ab (R+K+ und R-K-), sowie einmalig in der Situation „Kreuzender Radfahrer“ (R+K-).
- Zwei Probanden bremsten in der Variante R+K- der Situation „Kreuzender Radfahrer“ nicht ab.
- Ein Proband bremste in der Variante R-K- der Situation „Abbiegender PKW“ nicht.

#### 5.3.4.2 Kritikalität

Abbildung 36 zeigt den Anteil kritischer Begegnungen in den Szenarien mit Unterstützung zu beiden Informationszeitpunkten. Um den Einfluss der unabhängigen Variablen auf den Anteil kritischer Begegnungen zu evaluieren, wurde eine logistische Regression mit den unabhängigen Variablen als Prädiktoren und der Situationskritikalität als abhängige Variable durchgeführt (TTA<sub>min</sub> < 1 s vs. ≥ 1 s, siehe Tabelle 28).

<sup>17</sup> Aufgrund einer fehlenden Angabe gehen bei diesem Item nur 20 Urteile in die Analyse ein.

Tabelle 28: Logistische Regression; AV: Kritikalität ( $< 1$  s vs.  $\geq 1$  s); UVn: Zeitpunkt, Szenario, Konfliktspezifität, Richtungsspezifität, Interaktionen; Methode: Einschluss, Referenzkategorien:  $t_0$  (Zeitpunkt), Linksabbiegen bei Gegenverkehr (Szenario), unspezifische Anzeige (Richtung-/Konfliktspezifität). Modelgüte:  $\chi^2 = 227.16$ ,  $df = 23$ ,  $p < .001$ .

Prädiktor	B	Wald	df	p	OR
Zeitpunkt	-4.38	14.09	1	<.001	0.01
Szenario	-	9.94	2	.007	-
Konfliktspezifität	-1.03	1.91	1	.167	-
Richtungsspezifität	-0.69	0.85	1	.355	-
Szenario * Zeitpunkt	-	0.00	2	1.000	-
Konfliktspezifität * Richtungsspezifität	1.66	2.45	1	.117	-
Konfliktspezifität * Zeitpunkt	-	0.40	1	.527	-
Richtungsspezifität * Zeitpunkt	-	0.18	1	.671	-
Konfliktspezifität * Szenario	-	0.75	2	.687	-
Konfliktspezifität * Szenario * Zeitpunkt	-	0.00	2	1.000	-
Richtungsspezifität * Szenario	-	0.04	2	.978	-
Richtungsspezifität * Szenario * Zeitpunkt	-	0.00	2	1.000	-
Konfliktspezifität * Richtungsspezifität * Zeitpunkt	-	0.17	1	.677	-
Konfliktspezifität * Richtungsspezifität * Szenario	-	0.21	2	.903	-
Konfliktspezifität * Richtungsspezifität * Szenario * Zeitpunkt	-	0.00	2	1.000	-

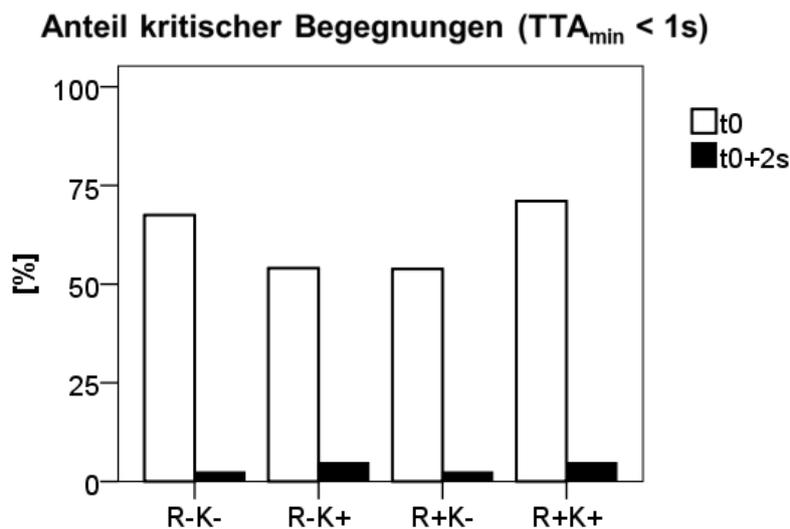


Abbildung 36: Anteil kritischer Begegnungen ( $TTA_{\min} < 1$  s).

Der **Zeitpunkt** der Fahrerinformationen hat einen deutlichen Einfluss auf den Anteil kritischer Begegnungen (siehe Abbildung 36). Während der Anteil kritischer Begegnungen bei späten Fahrerinformationen ( $t_0$ ) bei über 50% liegt, kommen diese bei frühzeitigen Informationen ( $t_0+2s$ ) kaum vor. Die **Spezifität** der Fahrerinformationen hat keinen Einfluss auf den Anteil an kritischen Begegnungen: Weder die Anzeige der Konfliktrichtung (siehe Tabelle 28; richtungsunspezifisch: 23%, richtungsspezifisch: 23%, Prädiktor **Richtungsspezifität**) noch die Art des Konfliktpartners (konfliktunspezifisch: 22%, konfliktspezifisch: 24%, Prädiktor **Konfliktspezifität**) verringern den Anteil der  $TTA_{\min}$ -Werte unter einer Sekunde.

### 5.3.4.3 Fahrerreaktion

#### 5.3.4.3.1 Time-to-arrival bei Bremsbeginn

Der **Zeitabstand bei Bremsbeginn** zum Konfliktpunkt hängt hauptsächlich vom Informationszeitpunkt ab (Effekt **Zeitpunkt**, siehe Abbildung 37 bzw. Tabelle 29). Werden die Probanden zum letztmöglichen Warnzeitpunkt ( $t_0$ ) über den bevorstehenden Konflikt informiert, beginnen sie bei einem Zeitabstand von ca. 0.9 s zum Konfliktpunkt mit dem Bremsen ( $M = 0.94$  s,  $SE = 0.06$ ). Werden die Probanden jedoch zwei Sekunden vorher informiert ( $t_{0+2s}$ ), bremsen sie bei einem Zeitabstand von ca. 2.7 s ( $M = 2.65$  s,  $SE = 0.06$ ).

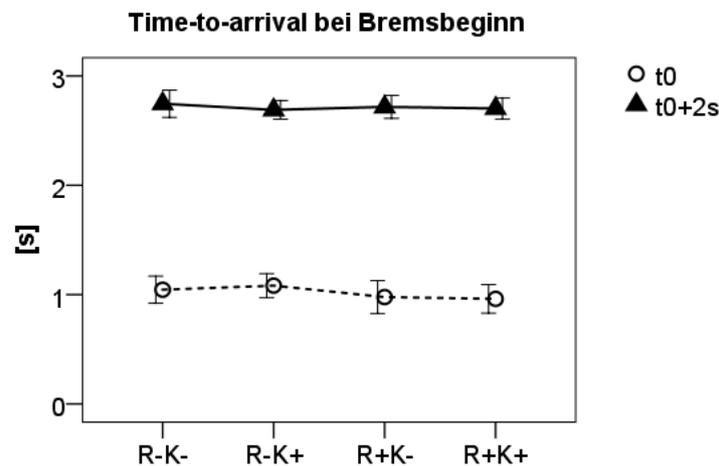


Abbildung 37: Time-to-arrival bei Bremsbeginn; dargestellt sind Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Tabelle 29: Time-to-arrival bei Bremsbeginn, ANOVA-Ergebnisse.

Effekt	F	df <sub>1</sub>	df <sub>2</sub>	p	$\eta^2$
Zeitpunkt	398.38	1	12	<.001	0.97
Szenario	0.01	1	12	.935	0.00
Konfliktspezifität	0.66	1	12	.433	0.05
Richtungsspezifität	0.98	1	12	.341	0.08
Zeitpunkt * Szenario	32.67	1	12	<.001	0.73
Zeitpunkt * Konfliktspezifität	0.51	1	12	.490	0.04
Szenario * Konfliktspezifität	1.66	1	12	.222	0.12
Zeitpunkt * Szenario * Konfliktspezifität	0.00	1	12	.960	0.00
Zeitpunkt * Richtungsspezifität	0.27	1	12	.612	0.02
Szenario * Richtungsspezifität	0.51	1	12	.489	0.04
Zeitpunkt * Szenario * Richtungsspezifität	1.19	1	12	.296	0.09
Konfliktspezifität * Richtungsspezifität	1.40	1	12	.259	0.11
Zeitpunkt * Konfliktspezifität * Richtungsspezifität	0.78	1	12	.396	0.06
Szenario * Konfliktspezifität * Richtungsspezifität	0.15	1	12	.709	0.01
Zeitpunkt * Szenario * Konfliktspezifität * Richtungsspezifität	0.03	1	12	.877	0.00

Weiterhin zeigt sich eine **Interaktion aus Zeitpunkt und Szenario**: Der Unterschied zwischen den beiden Informationszeitpunkten ist im Szenario „Abbiegender PKW“ deutlicher ausgeprägt ( $t_0$ :  $M = 0.92$  s,  $SE = 0.08$ ;  $t_{0+2s}$ :  $M = 2.77$  s,  $SE = 0.07$ ;  $F(1,14) = 565.14$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2 = .98$ ) als im Szenario „Kreuzender Radfahrer“ ( $t_0$ :  $M = 1.07$  s,  $SE = 0.05$ ;  $t_{0+2s}$ :  $M = 2.55$  s,  $SE = 0.05$ ;  $F(1,15) = 249.32$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2 = .94$ ). **Konfliktspezifität** und **Richtungsspezifität** haben hingegen keinen Einfluss auf den Zeitabstand, bei dem die Probanden mit dem Bremsen beginnen.

### 5.3.4.3.2 Maximale Bremspedalstellung

Wie aus Abbildung 38 ersichtlich, hängt die maximale Bremspedalstellung ebenfalls hauptsächlich vom Zeitpunkt der Informationsdarbietung ab (Effekt **Zeitpunkt**, siehe Tabelle 30 für die inferenzstatistischen Ergebnisse). Wenn die Probanden zum letztmöglichen Warnzeitpunkt ( $t_0$ ) informiert werden, bremsen sie im Durchschnitt mit starker Intensität ( $M = 58.44\%$ ,  $SE = 5.38$ ), wohingegen bei Informationen zwei Sekunden vor diesem Zeitpunkt ( $t_{0+2s}$ ) nur mittelstark gebremst wird ( $M = 16.40\%$ ,  $SE = 0.95$ ).

Zusätzlich findet sich eine marginal **signifikante Interaktion aus Zeitpunkt und Szenario**. Tendenziell ist der Effekt des Zeitpunkts beim Szenario „Kreuzender Radfahrer“ stärker ausgeprägt ( $t_0$ :  $M = 60.34\%$ ,  $SE = 6.49$ ;  $t_{0+2s}$ :  $M = 16.56\%$ ,  $SE = 1.52$ ;  $F(1,18) = 55.75$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2 = .76$ ) als beim Szenario „Abbiegender PKW“ ( $t_0$ :  $M = 57.12\%$ ,  $SE = 5.83$ ;  $t_{0+2s}$ :  $M = 17.10\%$ ,  $SE = 1.11$ ;  $F(1,16) = 43.08$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2 = .73$ ).

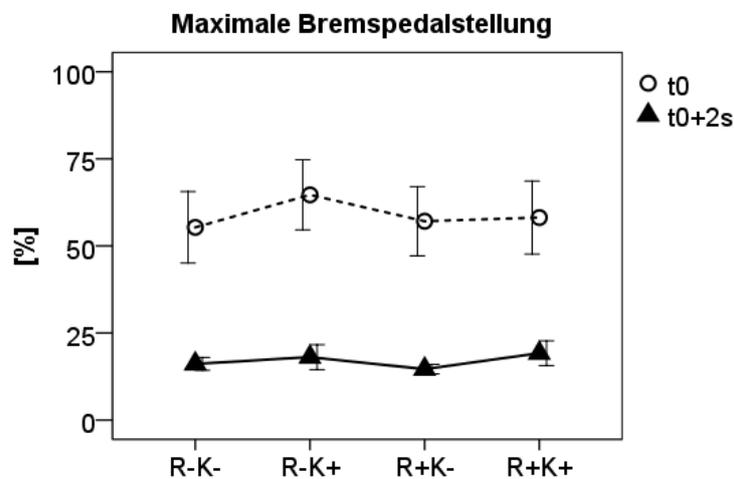


Abbildung 38: Maximale Bremspedalstellung; dargestellt sind Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Tabelle 30: Maximale Bremspedalstellung, ANOVA-Ergebnisse.

Effekt	F	df <sub>1</sub>	df <sub>2</sub>	p	$\eta^2$
Zeitpunkt	61.01	1	15	<.001	0.80
Szenario	1.39	1	15	.257	0.09
Konfliktspezifität	3.92	1	15	.066	0.21
Richtungsspezifität	1.40	1	15	.255	0.09
Zeitpunkt * Szenario	3.56	1	15	.079	0.19
Zeitpunkt * Konfliktspezifität	1.61	1	15	.224	0.10
Szenario * Konfliktspezifität	3.18	1	15	.095	0.18
Zeitpunkt * Szenario * Konfliktspezifität	0.11	1	15	.744	0.01
Zeitpunkt * Richtungsspezifität	2.00	1	15	.178	0.12
Szenario * Richtungsspezifität	0.05	1	15	.826	0.00
Zeitpunkt * Szenario * Richtungsspezifität	0.74	1	15	.403	0.05
Konfliktspezifität * Richtungsspezifität	0.05	1	15	.821	0.00
Zeitpunkt * Konfliktspezifität * Richtungsspezifität	1.59	1	15	.226	0.10
Szenario * Konfliktspezifität * Richtungsspezifität	2.24	1	15	.155	0.13
Zeitpunkt * Szenario * Konfliktspezifität * Richtungsspezifität	2.86	1	15	.112	0.16

Weiterhin bremsen die Fahrer bei konfliktspezifischen Informationen ( $M = 39.80\%$ ,  $SE = 3.10$ ) tendenziell stärker als bei konfliktunspezifischen Informationen ( $M = 35.04\%$ ,  $SE =$

2.93, Effekt **Konfliktspezifität**). Die marginal signifikante **Interaktion aus Konfliktspezifität und Szenario** ist darauf zurückzuführen, dass sich der Effekt der Konfliktspezifität vor allem im Szenario „Abbiegender PKW“ (K+:  $M = 40.47\%$ ,  $SE = 3.01$ ; K-:  $M = 33.74\%$ ,  $SE = 3.53$ ;  $F(1,16) = 4.66$ ,  $p = .046$ ,  $\eta^2 = .23$ ) zeigt, wohingegen im Szenario „Kreuzender Radfahrer“ keine Unterschiede in der maximalen Bremspedalstellung durch die Konfliktspezifität zu finden sind ( $F(1,18) = 1.53$ ,  $p = .232$ ,  $\eta^2 = .08$ ). Die Anzeige der Konfliktrichtung hat keinen Einfluss auf die maximale Bremspedalstellung (Effekt **Richtungsspezifität**).

### 5.3.4.4 Urteile

#### 5.3.4.4.1 Kritikalitätseinschätzung

Abbildung 39 zeigt die Verteilung der Urteile zur Situationskritikalität. Auch hier zeigt sich, dass die Szenarien, analog zur objektiven Kritikalität, bei frühzeitiger Information über die bevorstehenden Konfliktsituationen weniger kritisch eingeschätzt werden ( $t_{0+2s}$ :  $M = 4.80$  [„unangenehm“],  $SE = 0.65$ ) als bei Informationsdarbietung zum letztmöglichen Warnzeitpunkt ( $t_0$ :  $M = 7.58$  [„gefährlich“],  $SE = 0.43$ , Effekt **Zeitpunkt**). Der berichtete Unterschied zwischen den beiden Informationszeitpunkten ist im Szenario „Abbiegender PKW“ deutlicher ausgeprägt ( $t_0$ :  $M = 7.88$ ,  $SE = 0.38$ ;  $t_{0+2s}$ :  $M = 4.81$ ,  $SE = 0.62$ ;  $F(1,16) = 46.22$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2 = .74$ ) als im Szenario „Kreuzender Radfahrer“ ( $t_0$ :  $M = 7.16s$ ,  $SE = 0.42$ ;  $t_{0+2s}$ :  $M = 4.84s$ ,  $SE = 0.56$ ;  $F(1,18) = 44.89$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2 = .71$ , Interaktion **Zeitpunkt\*Szenario**). Ein Einfluss von **Richtungs-** oder **Konfliktspezifität** auf die Kritikalitätsurteile findet sich nicht.

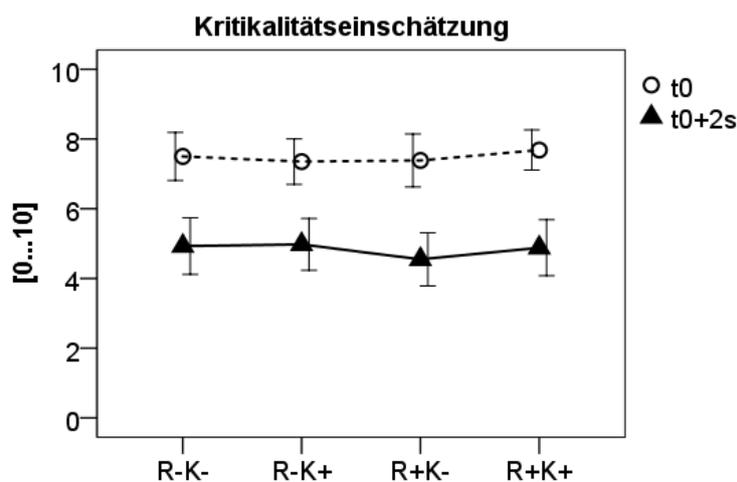


Abbildung 39: Kritikalitätseinschätzung; dargestellt sind Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Tabelle 31: Kritikalitätseinschätzung, ANOVA-Ergebnisse.

Effekt	F	df <sub>1</sub>	df <sub>2</sub>	p	η <sup>2</sup>
Zeitpunkt	45.51	1	15	<.001	0.75
Szenario	2.52	1	15	.133	0.14
Konfliktspezifität	1.33	1	15	.266	0.08
Richtungsspezifität	0.06	1	15	.816	0.00
Zeitpunkt * Szenario	8.57	1	15	.010	0.36
Zeitpunkt * Konfliktspezifität	0.48	1	15	.497	0.03
Szenario * Konfliktspezifität	0.50	1	15	.489	0.03
Zeitpunkt * Szenario * Konfliktspezifität	0.77	1	15	.394	0.05
Zeitpunkt * Richtungsspezifität	2.05	1	15	.173	0.12
Szenario * Richtungsspezifität	0.79	1	15	.388	0.05
Zeitpunkt * Szenario * Richtungsspezifität	3.15	1	15	.096	0.17
Konfliktspezifität * Richtungsspezifität	1.19	1	15	.293	0.07
Zeitpunkt * Konfliktspezifität * Richtungsspezifität	0.11	1	15	.751	0.01
Szenario * Konfliktspezifität * Richtungsspezifität	0.84	1	15	.375	0.05
Zeitpunkt * Szenario * Konfliktspezifität * Richtungsspezifität	0.44	1	15	.518	0.03

#### 5.3.4.4.2 Nützlichkeitschätzung

Auch hinsichtlich der eingeschätzten **Nützlichkeit** der Fahrerinformationen lässt sich eine Abhängigkeit vom **Informationszeitpunkt** feststellen (siehe Tabelle 32). Wie aus Abbildung 40 hervorgeht, werden frühe Fahrerinformationen ( $t_{0+2s}$ ) im Vergleich zu späten Fahrerinformationen ( $t_0$ ) als hilfreicher beurteilt (Effekt **Zeitpunkt**), wobei der Effekt des Zeitpunkts im Szenario „Abbiegender PKW“ stärker ausgeprägt ist als im Szenario „Kreuzender Radfahrer“ (Interaktion **Zeitpunkt\*Szenario**; Abbiegender PKW:  $M_{t_{0+2s}} = 11.59$ ,  $SE = 0.54$ ;  $M_{t_0} = 7.92$ ,  $SE = 0.94$ ;  $F(1,15) = 20.12$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2 = .57$ ; Kreuzender Radfahrer:  $M_{t_{0+2s}} = 11.46$ ,  $SE = 0.63$ ;  $M_{t_0} = 8.50$ ,  $SE = 0.75$ ;  $F(1,18) = 19.57$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2 = .52$ ).

Bezüglich der Nützlichkeit der Fahrerinformationen findet sich weiterhin eine 3-fach **Interaktion Zeitpunkt\*Szenario\*Richtungsspezifität**. Richtungsspezifische Fahrerinformationen ( $M = 10.80$ ,  $SE = 0.68$ ) werden im Szenario „Kreuzender Radfahrer“ als hilfreicher eingeschätzt als richtungsunspezifische Fahrerinformationen ( $M = 9.16$ ,  $SE = 0.64$ ;  $F(1,18) = 10.19$ ,  $p = .005$ ,  $\eta^2 = .36$ , Effekt **Richtungsspezifität**). Dies gilt im Szenario „Abbiegender PKW“ nur für frühzeitige Fahrerinformationen (Interaktion **Zeitpunkt\*Richtungsspezifität**:  $F(1,15) = 5.13$ ,  $p = .039$ ,  $\eta^2 = .26$ ): Richtungsspezifische Fahrerinformationen werden zu  $t_{0+2s}$  als hilfreicher eingeschätzt ( $M = 12.38$ ,  $SE = 0.61$ ) als richtungsunspezifische Fahrerinformationen ( $M = 10.81$ ,  $SE = 0.77$ ), während die Informationen zu  $t_0$  als vergleichbar hilfreich bewertet werden (richtungsspezifisch:  $M = 7.72$ ,  $SE = 0.95$ ; richtungsunspezifisch:  $M = 8.13$ ,  $SE = 0.99$ ).

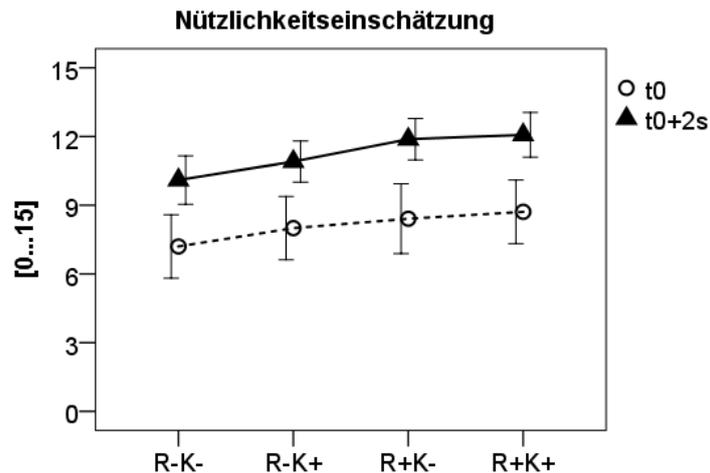


Abbildung 40: Nützlichkeitseinschätzung; dargestellt sind Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Tabelle 32: Nützlichkeitseinschätzung; ANOVA-Ergebnisse.

Effekt	F	df <sub>1</sub>	df <sub>2</sub>	p	η <sup>2</sup>
Zeitpunkt	19.53	1	14 <sup>18</sup>	.001	0.58
Szenario	6.34	1	14	.025	0.31
Konfliktspezifität	3.82	1	14	.071	0.21
Richtungsspezifität	4.24	1	14	.059	0.23
Zeitpunkt * Szenario	4.96	1	14	.043	0.26
Zeitpunkt * Konfliktspezifität	0.00	1	14	.957	0.00
Szenario * Konfliktspezifität	0.13	1	14	.721	0.01
Zeitpunkt * Szenario * Konfliktspezifität	0.85	1	14	.374	0.06
Zeitpunkt * Richtungsspezifität	0.93	1	14	.351	0.06
Szenario * Richtungsspezifität	3.71	1	14	.075	0.21
Zeitpunkt * Szenario * Richtungsspezifität	4.85	1	14	.045	0.26
Konfliktspezifität * Richtungsspezifität	0.71	1	14	.415	0.05
Zeitpunkt * Konfliktspezifität * Richtungsspezifität	0.18	1	14	.681	0.01
Szenario * Konfliktspezifität * Richtungsspezifität	1.14	1	14	.305	0.08
Zeitpunkt * Szenario * Konfliktspezifität * Richtungsspezifität	0.45	1	14	.514	0.03

Weiterhin führt die **Konfliktspezifität** der Anzeigen unabhängig vom Szenario tendenziell ebenfalls zu einer Steigerung der eingeschätzten Nützlichkeit (konfliktunspezifisch:  $M = 9.88$ ,  $SE = 0.67$ ; konfliktsspezifisch:  $M = 10.50$ ,  $SE = 0.57$ ).

## 5.4 Diskussion

Im Fokus der zweiten Studie stand die Untersuchung der Spezifität von Fahrerinformationen. Dafür wurden Fahrer in verschiedenen urbanen Fahrsituationen über drohende Kollisionen mit anderen Verkehrsteilnehmern visuell-auditiv informiert. Die untersuchten Situationen beinhalteten sowohl Konflikte im Längsverkehr als auch im Querverkehr. Die dargebotenen Informationen variierten in ihrer Konflikt- und Richtungsspezifität (d.h. Anzeige des Konfliktpartners: ja vs. nein bzw. Anzeige der Konfliktrichtung: ja vs. nein, within-design). Um die relative Bedeutung der Spezifität der Anzeigen gegenüber den Auswirkungen des Informationszeitpunkts zu untersuchen, wurde die Informationsdarbietung in einigen

<sup>18</sup> Reduktion der Freiheitsgrade aufgrund eines fehlenden Urteils im Szenario „Abbiegender PKW“.

Szenarien sowohl zum letztmöglichen Warnzeitpunkt  $t_0$ , als auch zwei Sekunden vor diesem Zeitpunkt untersucht ( $t_{0+2s}$ , within-design).

#### 5.4.1 Beurteilung der Spezifität der Fahrerinformationen

Zusammengefasst zeigte sich nur ein geringer Einfluss der Richtungs- und Konfliktspezifität auf das Fahrverhalten in den Konfliktsituationen. Wenn Effekte auftraten, waren diese meist nur marginal signifikant und im Hinblick auf ihre Wirkung auf das Fahrverhalten und die Kritikalität der Konfliktsituationen praktisch nicht bedeutsam. Insbesondere im Hinblick auf die Wirksamkeit der Fahrerinformationen lässt sich festhalten, dass konflikt- und richtungsspezifische gegenüber unspezifischen Anzeigen nicht zu einer (weiteren) Senkung des Anteils an kritischen Begegnungen führten. Die Ergebnisse sprechen somit dafür, dass auch unspezifische Informationen über einen drohenden Verkehrskonflikt den Fahrer bei der Bewältigung von urbanen Konfliktsituationen effektiv unterstützen können. Da in dieser Studie keine Blickerfassung durchgeführt wurde, ist allerdings keine Aussage über mögliche Wirkungsunterschiede der Anzeigevarianten auf spezifische Teilaspekte der Fahrerreaktion, wie die Fixation der Anzeigeelemente oder die Blickzuwendung zum Konfliktpartner, möglich (siehe Weller et al., 2014; Zarife, 2014). So wäre es beispielsweise denkbar, dass spezifische Anzeigen auch in dieser Studie zu einer schnelleren Blickzuwendung geführt haben, was jedoch nicht in einer Verkürzung der Bremsreaktionszeit resultierte (siehe Zarife, 2014).

Hinsichtlich der Akzeptanz der Fahrerinformationen lässt sich festhalten, dass die Fahrer spezifische Informationen gegenüber unspezifischen präferierten, auch wenn sich hierfür kein objektiver Nutzen aus dem Fahrverhalten ableiten ließ. Richtungs- und konfliktspezifische Informationen wurden bei frühzeitiger Informationsdarbietung ( $t_{0+2s}$ ) als hilfreicher eingeschätzt als unspezifische Informationen. Auch die Nachbefragungsergebnisse unterstreichen den generell positiven Einfluss der Spezifität auf die Akzeptanz der Fahrerunterstützung. Richtungsspezifische Informationen wurden allerdings in manchen Punkten positiver beurteilt als konfliktspezifische Informationen:

- Es fand sich eine höhere Varianzaufklärung der Nützlichkeitsurteile durch den Faktor Richtungsspezifität als durch den Faktor Konfliktspezifität bei Betrachtung des frühzeitigen Informationszeitpunkts ( $t_{0+2s}$ ).
- Unter Einbezug des späten Informationszeitpunkts ( $t_0$ ) fanden sich signifikant höhere Nützlichkeits-Einschätzungen in Abhängigkeit vom Versuchsszenario nur noch bei richtungsspezifischen Informationen. Der Einfluss der Konfliktspezifität war in den Szenarien mit Informationsdarbietung zu beiden Zeitpunkten hingegen nur marginal signifikant.
- In der Nachbefragung gaben die Probanden zudem an, dass die zusätzliche Anzeige der Art des Konfliktpartners, nicht aber der Konfliktrichtung, stärker vom Fahren ablenken würde.

Im Hinblick auf die Konfliktspezifität des Anzeigekonzepts werden somit die Ergebnisse früherer Studien, die keine objektive Wirksamkeitssteigerung durch konfliktspezifische Anzeigen berichten, weitgehend bestätigt (Cummings et al., 2007; Thoma et al., 2009; Zarife, 2014). Dass sich trotzdem eine Steigerung der wahrgenommenen *subjektiven* Wirksamkeit durch konfliktspezifische Anzeigen fand, steht im Einklang mit den Ergebnissen von Totzke und Volk (2013). Während manche frühere Studien eine Wirksamkeitssteigerung durch richtungsspezifische Anzeigekonzepte finden (Weller et al., 2014; Zhang et al., 2014), stehen die Ergebnisse dieser Studie im Einklang mit Untersuchungen, die keine Wirksamkeitssteigerung richtungsspezifischer Warnsignale berichten (Bliss & Acton, 2003; Fricke, 2009; Yan et al., 2014).

Zarife (2014) führte eine ähnliche Untersuchung durch, in der ebenfalls die Richtungs- und Konfliktspezifität des Anzeigekonzepts variiert wurde. Richtungsspezifische Anzeigen führten in der Studie von Zarife (2014) zwar zu einer früheren Fixation des Konfliktpartners, gingen

jedoch ebenfalls mit einer späteren Bremsreaktion und einem geringeren minimalen Zeitabstand zum Konfliktpartner einher als unspezifische Warnungen. In der vorliegenden Arbeit führte die Anzeige der Konfliktrichtung nicht in vergleichbarer Weise zu einer späteren Bremsreaktion oder zu einem geringeren Abstand zwischen den Konfliktpartnern. Ein Grund hierfür könnte in der Verwendung von unterschiedlichen Anzeigekonzepten in den beiden Studien liegen. Im Gegensatz zu dieser Arbeit wurden die visuellen Anzeigen in der Studie von Zarife (2014) nicht im Head-Up Display, sondern im Kombiinstrument (Head-Down Display) angezeigt. Außerdem wurden bei Zarife (2014) Art und Richtung des Konflikts mit Hilfe zweier separater Symbole dargestellt (Konfliktart: Anzeige eines Radfahrer-, Fußgänger- oder PKW-Symbols; Konfliktrichtung: Einfärbung von Kreissegmenten um ein stilisiertes Fahrzeug unterhalb der Darstellung des Konfliktpartners). In der vorliegenden Arbeit wurden beide Symbole innerhalb eines Anzeigeelements kombiniert dargeboten. Verglichen mit der parallelen Informationsdarbietung an unterschiedlichen Anzeigeebenen erleichtert die Kombination mehrerer Informationen in visuellen Displays im Allgemeinen deren Verarbeitung (Wickens & Carswell, 1995). Aus diesem Grund erforderte das von Zarife (2014) verwendete Anzeigekonzept von den Probanden möglicherweise einen höheren Verarbeitungsaufwand bei der kognitiven Integration der beiden separat dargebotenen Display-Elemente und bei der Entscheidung zur Einleitung einer Bremsreaktion. Dies könnte womöglich zu einer Verlängerung der Bremsreaktionszeiten geführt haben.

#### 5.4.2 Beurteilung des Effekts des Informationszeitpunkts

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass dem Zeitpunkt der Darbietung von Fahrerinformationen eine größere Bedeutung für deren Wirksamkeit zukommt als der Richtungs- und Konfliktspezifität. Der Informationszeitpunkt hat einen deutlichen und konsistenten Einfluss auf die Fahrerreaktionen und die Akzeptanz der Fahrerunterstützung. Sofern Fahrer frühzeitig ( $t_{0+2s}$ ) über drohende Konfliktsituationen informiert wurden, reagierten sie, unabhängig von der Spezifität der Anzeige, mit einer Geschwindigkeitsreduktion. In der Folge sank die resultierende objektive und subjektive Situationskritikalität bei frühen Fahrerinformationen gegenüber Informationen zum letztmöglichen Warnzeitpunkt deutlich. Kritische Begegnungen zwischen den Konfliktpartnern traten bei frühzeitigen Fahrerinformationen nur noch vereinzelt auf. Zusammengefasst bestätigen die vorliegenden Ergebnisse die Befunde aus Studie I und erweitern diese hinsichtlich des Einflusses der Spezifität der Fahrerinformationen. Die Spezifität des Anzeigekonzepts beeinflusste den Effekt des Informationszeitpunkts in den meisten Fällen nicht (d.h. die Effekte des Informationszeitpunkts waren weitestgehend unabhängig von der Spezifität der Anzeigen).

Die berichtete Wirksamkeitssteigerung durch frühzeitige im Gegensatz zu späten Fahrerinformationen steht im Einklang mit Studien zu frühzeitigen Warnungen in urbanen Verkehrssituationen. Werneke und Vollrath (2013) berichten ebenfalls von positiven Effekten einer frühzeitigen Warnung, die etwa 5 s<sup>19</sup> (Warndistanz 70 m, bei einer angenommenen Geschwindigkeit von 50 km/h) vor Erreichen einer Kreuzung angezeigt wurde, verglichen mit einer späten Warnung, die erst bei Auslösung der Situation aktiviert wurde. Auch Yan et al. (2014) berichten eine Steigerung der Wirksamkeit von sprachbasierten Warnungen vor kreuzendem Verkehr bei einem frühen Darbietungszeitpunkt von 5 s vor Erreichen der Kreuzung, verglichen mit einem späten Darbietungszeitpunkt von 3 s.

#### 5.4.3 Negative Effekte der Fahrerinformationen

Obwohl sich keine positiven Verhaltenseffekte durch spezifische Anzeigekonzepte fanden (z.B. Bremsbeginn in größerem Abstand zum Konfliktpunkt), bleibt festzuhalten, dass auch keine Nachteile der spezifischen Anzeigen in den untersuchten Prüfsituationen festgestellt werden konnten, wie die Ergebnisse von Studie I vermuten ließen. So ist keine *Steigerung*

<sup>19</sup> Der frühe Warnzeitpunkt der vorliegenden Studie ( $t_{0+2s}$ ) entspricht 4.87 s vor dem Erreichen des Konfliktpunkts.

der Situationskritikalität bzw. *Minderung* der Fahrerakzeptanz durch die komplexeren, spezifischen Anzeigen gegenüber einer unspezifischen Informationssymbolik zu verzeichnen. Insbesondere bei Informationen zum letztmöglichen Warnzeitpunkt ( $t_0$ ) führten komplexe Fahrerinformationen weder zu einem späteren Bremsbeginn, noch steigerten sie die Situationskritikalität. Insofern kann es als unwahrscheinlich angesehen werden, dass die Steigerung der Kritikalität bei Fahrerinformationen zum letztmöglichen Warnzeitpunkt gegenüber der nicht-assistierten Fahrt in Studie I auf einen Ablenkungseffekt zurückzuführen ist. Bei Verwendung von noch komplexeren als den in dieser Untersuchung verwendeten Anzeigeelementen ist eine Minderung von Wirksamkeit und Akzeptanz durch ein höheres Ablenkungspotential der Anzeigen jedoch nicht auszuschließen. Die Studienergebnisse sind in diesem Sinne auf aufgabenrelevante, visuelle Anzeigeelemente im zentralen Sichtbereich des Fahrers (Anzeige über simuliertes HUD) beschränkt.

#### 5.4.4 Einschränkungen der Studie

In dieser Studie stand die Untersuchung der Spezifität von visuell-auditiven Fahrerinformationen im Mittelpunkt. Eine positive Auswirkung spezifischer gegenüber unspezifischen Anzeigen auf das Fahrverhalten und die Kritikalität der Prüfsituationen konnte nicht gefunden werden. In diesem Kontext muss darauf hingewiesen werden, dass die Ergebnisse auf die verwendete Konfiguration der Mensch-Maschine-Schnittstelle beschränkt sind (d.h. diskrete Anzeigen<sup>20</sup> im simulierten HUD begleitet von einem unaufdringlichen und ungerichteten Ton). Möglicherweise würde eine andere Art der Enkodierung der an den Fahrer übermittelten Information zu einer Steigerung der Verhaltenswirksamkeit führen. Dies wird im Folgenden diskutiert.

In dieser Studie wurden sowohl die Art des Konfliktpartners, als auch die Konfliktrichtung über Piktogramme im simulierten HUD angezeigt. Es ist möglich, dass eine andere Anzeigesymbolik die Wirksamkeit spezifischer Anzeigen begünstigt hätte. Die in meiner Arbeit verwendeten Anzeigen entsprachen sog. *endogenen Cues* (Berger et al., 2005; Jonides, 1981; Posner et al., 1978; Posner et al., 1980), was bedeutet, dass die Hinweise auf die Art und Richtung des Konflikts symbolisch enkodiert waren. Der Fahrer muss hierbei eine Blickzuwendung zum Anzeigeelement, die Interpretation des angezeigten Symbols und eine anschließende willkürliche Aufmerksamkeitsausrichtung zum angezeigten Konfliktort bzw. Konfliktpartner leisten. Durch Fortschritte im Bereich der Display-Technologie sind sog. kontaktanaloge Head-Up Displays möglich, bei denen ein weitaus größerer Bereich der Windschutzscheibe zur Informationsübermittlung genutzt werden kann. Durch diese Technologie wäre auch die direkte Markierung des jeweiligen Konfliktpartners am betreffenden Ort der Windschutzscheibe möglich (sog. *exogenes cueing*, siehe bspw. Werneke und Vollrath, 2013). Hierdurch würde die Notwendigkeit der Blickzuwendung auf ein Display und die Interpretation der dargebotenen Information vermieden, wodurch sich die Verhaltenswirksamkeit der Fahrerinformationen möglicherweise steigern ließe.

Weiterhin sind die Ergebnisse dieser Arbeit auf eine visuelle Darbietung der konflikt- und richtungsspezifischen Informationen beschränkt. Mittels der auditiven Komponente der Fahrerinformation wurde weder die Konfliktrichtung (z.B. durch räumlich gerichtete Töne, siehe Zarife, 2014), noch der Konfliktpartner (z.B. durch spezifische Warntöne, siehe Fricke, 2009) an den Fahrer übermittelt, was die Wirksamkeit der Anzeigen womöglich gesteigert hätte. Andererseits ist es fraglich, ob sich in Anbetracht der Frühzeitigkeit der untersuchten Anzeigen durch eine Veränderung der Mensch-Maschine-Schnittstelle tatsächlich eine entscheidende Steigerung der Wirksamkeit erreichen lässt. Auch bei unspezifischen Warnsignalen, wie sie in dieser Studie verwendet wurden, reagierten die Fahrer rechtzeitig und entschärften die Konfliktsituationen durch größtenteils moderate Bremsengriffe. Eine

<sup>20</sup> Die Informationen wurden bei Überschreitung des TTA-Schwellwerts zur Informationsauslösung angezeigt (Zustand der Anzeige: an/aus). Es gab keine Zwischenstufen mit Anzeigen verschiedener Dringlichkeit.

noch frühzeitigere Reaktion, bedingt durch ein verändertes Anzeigekonzept, scheint zur Konfliktentschärfung in den untersuchten Szenarien nicht notwendig.

#### **5.4.5 Schlussfolgerungen**

Für die Wirksamkeit der Fahrerunterstützung war die Richtungs- und Konfliktspezifität des Anzeigekonzepts in dieser Studie nicht entscheidend. Vielmehr hing die Wirksamkeit der Fahrerunterstützung vom Zeitpunkt der Informationsdarbietung ab. Im Hinblick auf die Akzeptanz der Fahrerunterstützung kann grundsätzlich sowohl die Darstellung der Richtung, aus der eine Konfliktsituation droht, als auch die Darstellung des jeweiligen Konfliktpartners in der Mensch-Maschine-Schnittstelle empfohlen werden. In Bezug auf die Darstellung des Konfliktpartners ist jedoch einschränkend zu erwähnen, dass die Probanden in der Nachbefragung angaben, von konfliktspezifischen Anzeigen in stärkerem Maße abgelenkt gewesen zu sein als von konfliktunspezifischen Anzeigen. Im Gegensatz zur Richtungsspezifität steigerte die Konfliktspezifität die Nützlichkeitsurteile unter Einbezug beider Informationszeitpunkte außerdem nur tendenziell. Vor dem Hintergrund dieser Einschränkungen und der Ergebnisse aktueller Studien, welche ebenfalls die Anzeige der Konfliktrichtung, nicht aber des Konfliktpartners empfehlen (Zarife, 2014), werden nur richtungsspezifische Informationen zur Integration in die Mensch-Maschine-Schnittstelle ohne Einschränkungen empfohlen.

Gleichwohl bleibt zu betonen, dass die Effekte auf das Fahrverhalten und die objektive Wirksamkeit in dieser Studie hauptsächlich auf den Zeitpunkt der Informationsdarbietung zurückzuführen waren. Unabhängig von der Spezifität reagierten die Probanden frühzeitiger und absolvierten die Prüfsituationen sicherer, wenn sie frühzeitig über die bestehenden Verkehrskonflikte informiert wurden. Im Gegensatz zu diesem konsistenten Befund des Informationszeitpunkts war die Spezifität der Anzeigeelemente von geringer Bedeutung für die Wirksamkeit des Unterstützungskonzepts.

## 6 Studie III: Auswirkungen von Falsch- und Fehlinformationen

### 6.1 Fragestellung und Studienaufbau

Das vorliegende Kapitel stellt die Ergebnisse der dritten Studie vor. Diese stellt den Schwerpunkt der gesamten Arbeit dar und verfolgt mehrere Ziele: Zum einen soll das in Studie I und II erarbeitete Unterstützungskonzept an einer größeren Stichprobe evaluiert werden. Dieser Studienteil stellt eine Replikation der bisherigen Studienergebnisse dar. Andererseits soll das Unterstützungskonzept vor dem Hintergrund möglicher Unzulänglichkeiten der Situationsanalyse, und der damit einhergehenden Unzuverlässigkeit der übermittelten Fahrerinformationen, abgesichert werden. Insbesondere sollen mögliche negative Folgen dieser Unzuverlässigkeit, wie das Auftreten falscher Alarme oder fehlerhafter Fahrerinformationen, auf Fahrerreaktion und Akzeptanz der Fahrerunterstützung empirisch untersucht werden. Die dritte Studie setzt sich folglich aus mehreren inhaltlich getrennten Teilstudien zusammen (Studienteile A, B und C, siehe Tabelle 33), die jeweils einer separaten Fahrt entsprechen.

Im **Studienteil A** steht die Evaluation der **Wirksamkeit** der in den vorhergehenden Studien entwickelten Fahrerunterstützung unter zusätzlicher Variation der **Dringlichkeit** der dargebotenen Informationen im Mittelpunkt. In Studie I konnte gezeigt werden, dass eine visuell-auditive Fahrerunterstützung eine Sekunde vor dem letztmöglichen Warnzeitpunkt ( $t_{0+1s}$ ) zeitkritische Konfliktsituationen, verglichen mit Fahrten ohne Unterstützung, deutlich entschärft. Andererseits steigerten Informationen zum letztmöglichen Warnzeitpunkt ( $t_0$ ) die Kritikalität gegenüber nicht-assistierten Fahrten. Noch spätere Informationen ( $t_{\text{Information}} > t_{0+1s}$ ) gingen, verglichen mit Informationen zu  $t_{0+1s}$ , zwar mit einem noch früheren Bremsbeginn und einer weiteren Senkung der subjektiven Kritikalität einher, nicht jedoch mit einer Senkung der objektiven Situationskritikalität (Anteil an  $TTC_{\min}/TTA_{\min} < 1s$ ). Außerdem könnte die Verschiebung des Prädiktszeitpunkts um eine zusätzliche Sekunde ( $t_{0+2s}$ ) vor dem Hintergrund der möglichen Unzuverlässigkeit von prädiktiven Fahrerinformationen deren Unzuverlässigkeit entscheidend erhöhen (Seeliger et al., 2014; Weidl et al., 2014). Aus diesem Grund wurde die Informationsdarbietung eine Sekunde vor dem letztmöglichen Warnzeitpunkt empfohlen. Um diese Empfehlung empirisch abzusichern, wird dieser Zeitpunkt in dem vorliegenden Studienteil an einer größeren Stichprobe evaluiert.

Studie II behandelte die Spezifität von Fahrerinformationen mit dem Ergebnis, dass Fahrer auch infolge unspezifischer Fahrerinformationen ihr Fahrverhalten in Konfliktsituationen frühzeitig anpassen und kritische Begegnungen mit den jeweiligen Konfliktpartnern vermeiden. Die zusätzliche Anzeige der Art des Konfliktpartners sowie der Konfliktrichtung steigerte das subjektive Nützlichkeitsempfinden, auch wenn kein objektiver Nutzen im Fahrverhalten vorlag. Auf Basis von Studie II wurde entschieden, die Anzeige der Konfliktrichtung für die Evaluation der Wirksamkeit in Studie III beizubehalten. Dies erfolgte einerseits, da die Probanden von einer gesteigerten Ablenkung durch konfliktspezifische, nicht aber richtungsspezifische Informationen berichteten. Andererseits hatten auch frühere Untersuchungen die Nützlichkeit richtungsspezifischer, nicht aber konfliktspezifischer Anzeigen bei drohenden Verkehrskonflikten gezeigt (Weller et al., 2014; Zarife, 2014).

Zusätzlich zur Replikation bisheriger Ergebnisse sollte untersucht werden, ob eine rein visuelle, verglichen mit einer visuell-auditiven Fahrerunterstützung, ausreicht, wenn die Fahrer frühzeitig (d.h. zu  $t_{0+1s}$ ) über drohende Konflikte informiert werden. Im Mittelpunkt steht dabei die Frage der Dringlichkeit der dargebotenen Warnsignale. Einerseits ist infolge einer gesteigerten Dringlichkeit durch die Verwendung einer zusätzlichen auditiven Komponente eine Wirksamkeitssteigerung der Fahrerunterstützung zu erwarten (Campbell et al., 2007; COMSIS Corporation, 1996; Kramer et al., 2007; Politis et al., 2013), andererseits ist es denkbar, dass falsche Alarme gerade dann die Akzeptanz und Wirksamkeit der Fahrerunterstützung einschränken, wenn diese Signale als besonders dringlich wahrgenommen werden (Bliss & Acton, 2003; Cotté et al., 2001; J. Hoffmann & Gayko, 2012; Lee et al., 2004). Bei frühzeitigen Fahrerinformationen ist es außerdem vorstellbar,

dass ein rein visuelles Warnsignal ausreichend ist, um die Fahrer auf den drohenden Verkehrskonflikt hinzuweisen und eine Reaktionsbereitschaft herzustellen (Scott & Gray, 2008). Im Gegensatz zu den in Studie I und II verwendeten abhängigen Studiendesigns wurde in dieser Studie ein unabhängiger Versuchsplan (Assistenzbedingung: Baseline vs. visuell vs. visuell-auditiv) gewählt.

Tabelle 33: Aufbau Studie III.

Studienteil	Beschreibung	Uabhängige Variablen	
		Assistenzbedingung	Zuverlässigkeit
A: Wirksamkeit	Wirksamkeitsuntersuchung des in Studie I und II erarbeiteten Unterstützungskonzepts unter zusätzlicher Betrachtung der Dringlichkeit der Anzeige (visuell vs. visuell-auditiv)	Baseline vs. visuell vs. visuell-auditiv	100%
B: Zuverlässigkeit	Untersuchung der Effekte falscher und unnötiger Alarme auf die Fahrerreaktion und Akzeptanz	Baseline vs. visuell vs. visuell-auditiv	100% vs. 60% mit falschen Alarmen vs. 60% mit unnötigen Alarmen
C: Fehlerhafte Richtungsanzeige	Untersuchung der Effekte fehlerhafter Richtungsanzeigen auf Fahrerreaktion und Akzeptanz	Baseline vs. visuell vs. visuell-auditiv	Unspezifische Anzeige vs. Fehlerhafte Richtungsanzeige

Die weiteren Studienteile von Studie III wurden mit dem Ziel, die Auswirkungen von **Unzuverlässigkeit der Situationsprädiktion** zu untersuchen durchgeführt. In **Studienteil B** wird der Einfluss **falscher und unnötiger** Informationen auf die Fahrerreaktion und Akzeptanz untersucht. Im Fokus der Studie stand die Frage, inwieweit verschiedene Arten der Falschinformationen (d.h. Fahrer wird über potentiellen Konflikt informiert, obwohl es im weiteren Situationsverlauf nicht zu einer Konfliktsituation kommt) die Wirksamkeit und Akzeptanz der Mensch-Maschine-Schnittstelle einschränken. Da zu diesem Thema noch wenige Forschungsarbeiten vorliegen (Cotté et al., 2001; Lees & Lee, 2007; Yamada & Kuchar, 2006), wurden zwei zentrale Fragen in den Mittelpunkt gestellt:

- Unterscheiden sich die Auswirkungen falscher Alarme (bei denen tatsächlich keine für den Fahrer nachvollziehbare Ursache für deren Darbietung vorliegt) von denjenigen unnötiger Alarme (bei denen zwar ein Konfliktpartner im jeweiligen Szenario anwesend ist, es jedoch letztlich zu keinem Verkehrskonflikt kommt)?
- Welche Bedeutung hat die Dringlichkeit der Fahrerinformationen (visuell vs. visuell-auditiv) für die Auswirkungen von falschen und unnötigen Alarmen?

Neben der Ausgabe von falschen bzw. unnötigen Alarmen besteht eine weitere Grenze der Situationsprädiktion darin, dass tatsächlich vorliegende Konflikte zwar erkannt, jedoch fehlerhafte an den Fahrer übermittelt werden. Im Kontext des vorliegenden Untersuchungsgegenstands könnte dem Fahrer beispielsweise der falsche Konfliktpartner oder die falsche Konfliktrichtung angezeigt werden. Trotz immer komplexer werdender Anzeigestrategien von Warnkonzepten (z.B. Totzke et al., 2011a; Werneke & Vollrath, 2013; Zarife, 2014) wurde der Untersuchung fehlerhafter Anzeigen bisher wenig Beachtung geschenkt (Herzberg, 2012; Totzke et al., 2013). Im **Studienteil C** wurden deshalb die Effekte **fehlerhafter Richtungsanzeigen** in Fahrsituationen mit **Einfach-** und **Mehrfachkonflikten** untersucht. Bei Einfachkonflikten ist nur ein Konfliktpartner anwesend, der sich aus einer anderen als der angezeigten Richtung annähert. Bei Mehrfachkonflikten nähert sich ein zusätzlicher Konfliktpartner aus der angezeigten Richtung an, der jedoch anhält. Untersuchungsfrage war hierbei, inwieweit fehlerhafte Richtungsanzeigen, welche Aufgrund von Fehlern bei der Situationsprädiktion nicht auszuschließen sind, zu einer erhöhten Bremsreaktionszeit und damit zu einer Wirksamkeits- und Akzeptanzminderung der Fahrerunterstützung führen.

## 6.2 Methodik

### 6.2.1 Versuchsumgebung und Mensch-Maschine-Schnittstelle

Im dritten Studienteil wurde dieselbe Versuchsumgebung (statischer Fahrsimulator, siehe Abschnitt 4.2.1 für eine detaillierte Beschreibung) und Anzeigestrategie (Anzeige im simulierten HUD, siehe Abschnitt 4.2.2 für eine detaillierte Beschreibung) wie in den vorangegangenen Studien I und II gewählt. Auf Basis der Ergebnisse von Studie II wurde in dieser Studie auf die Anzeige des Konfliktpartners verzichtet. Stattdessen wurden nur richtungsspezifische Anzeigen verwendet.

### 6.2.2 Abhängige Variablen

Analog zu den vorhergehenden Studien wurden während der Fahrt verschiedene objektive Variablen der Fahrerreaktion (Time-to-arrival bei Bremsbeginn, maximale Bremspedalstellung), Situationskritikalität (Anteil kritischer Begegnungen) und subjektiven Nützlichkeits einschätzung erhoben (siehe Abschnitt 4.2.6). In der zweiten Teilstudie (**B**) wurde keine Befragung während der Fahrt durchgeführt (Einschätzung der Situationskritikalität und Nützlichkeit der Fahrerinformation), da erwartet wurde, dass sich eine Fahrtunterbrechung nachteilig auf die objektiven Variablen auswirken könnte (z.B. Proband bremst bei Darbietung falscher Informationen, ohne dass Verkehrssituation dies erfordert hätte, da er eine Fahrtbefragung erwartet).

Nach jeder Fahrt (A: Dringlichkeit, B: falsche und unnötige Alarme, C: falsche Richtungsanzeigen) wurde eine Nachbefragung zur Akzeptanz der Fahrerinformationen durchgeführt. Die bereits verwendete Nachbefragung aus Studienteil II (siehe Abschnitt 5.2.3) wurde hierfür um den Untersuchungsgegenstand der Zuverlässigkeit der Fahrerinformationen erweitert. Insbesondere wurden Fragebogen-Items, die sich auf die wahrgenommene Störung durch die Fahrerinformationen (z.B. „Die Information war nervig“; „Die Information war störend“; „Die Information war unnötig“) und die Einschätzung der Gebrauchssicherheit („*Safety of Use*“, siehe Becker et al., 2004) der Fahrerinformationen (z.B. „Durch die Information habe ich andere Verkehrsteilnehmer gefährdet“) beziehen, in den Fragebogen aufgenommen (siehe Tabelle 34). Weiterhin sollten die Fahrer nach jedem Studienteil angeben, ob sie das jeweilige Assistenzsystem selbst im Straßenverkehr nutzen würden. Nach der ersten Fahrt (A: Dringlichkeit) sollten die Probanden zusätzlich Gründe angeben, falls sie ein solches System im Alltag nicht nutzen würden.

Tabelle 34: Nachbefragungs-Items.

Subjektive Angaben	Frage	Skala
Leichtigkeit der Benutzung („Ease of Use“)	Das Lesen der Information war anstrengend. Die Information war nervig. Die Information war störend. Die Information war unnötig.	5-stufig (trifft zu – trifft nicht zu)
Gebrauchssicherheit („Safety of Use“)	Die Information hat vom Fahren abgelenkt. Durch die Information habe ich andere Verkehrsteilnehmer gefährdet	
Nützlichkeit („Usefulness“)	Die Information wird im Alltag Unfälle verringern. Das Informationssystem war zuverlässig. Ich würde das System im Alltag nutzen. Durch die Information habe ich Konflikte schneller erkannt. Die Information war nachvollziehbar. Die Information war hilfreich. Durch die Information wurde das Fahren sicherer.	

Im Rahmen von Studie III wurden zusätzliche Daten für eine Diplomarbeit (Schöttl, 2014, Studienteil C) und eine Bachelorarbeit (Kolb, 2013, Studienteil A) erhoben. Die für diese Arbeiten zusätzlich erhobenen Blickdaten wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht

verwendet. Die Ideen zur Versuchsplanung und -durchführung entstammen vom Autor der vorliegenden Arbeit. Die hier dargestellten Daten wurden vom Autor ausgewertet, dargestellt und sind nicht aus den Arbeiten von Schöttl (2014) und Kolb (2014) entnommen.

### 6.2.3 Stichprobe

An der Untersuchung nahmen  $N = 81$  Fahrer (43 weiblich und 38 männlich) aus dem Testfahrerpanel der WIVW GmbH teil. Alle Fahrer hatten vor der Untersuchung an einem ausführlichen Fahrertraining teilgenommen. Die Fahrer waren zum Zeitpunkt der Untersuchung im Mittel 38 Jahre alt ( $SD = 15$  Jahre,  $MIN = 20$  Jahre,  $MAX = 71$  Jahre) und hatten eine mittlere Fahrpraxis von 19 Jahren ( $SD = 14$  Jahre,  $MIN = 2$  Jahre,  $MAX = 50$  Jahre). Im Durchschnitt hatten die Fahrer im abgelaufenen Jahr eine Fahrleistung von 14200 km absolviert ( $SD = 12200$  km,  $MIN = 300$  km,  $MAX = 70000$  km). Die Fahrer hatten weder an einer der vorhergehenden Untersuchungen dieser Arbeit, noch an einer anderen Studie mit vergleichbarem Inhalt teilgenommen.

### 6.2.4 Versuchsablauf

Der Versuchsablauf der dritten empirischen Studie ist in Tabelle 35 dargestellt. Nach der Begrüßung durch den Versuchsleiter wurden die Fahrer instruiert, die Strecken zügig und unter Beachtung der Straßenverkehrsordnung zu durchfahren. Die Fahrer wurden ebenfalls darüber informiert, dass sie durch ein Fahrerinformationssystem unterstützt werden würden. Art und Funktionsweise des Fahrerinformationssystems wurden nicht näher erläutert. Es folgte eine kurze Stadtstrecke zur erneuten Gewöhnung an den Fahrsimulator, bei der die Probanden keine kritischen Verkehrssituationen erlebten, und die Fahrerunterstützung nicht aktiviert wurde.

Im Anschluss erfolgte der Hauptversuch. Hierbei wurden die drei oben beschriebenen Versuchsfahrten (A: Dringlichkeit, B: falsche und unnötige Alarmer, C: falsche Richtungsanzeigen) in fixer Reihenfolge durchfahren. Im Anschluss an die jeweiligen Versuchsfahrten erfolgte eine kurze Nachbefragung. Der Grund für die feste Reihenfolge der Versuchsteile wird in den folgenden Absätzen erläutert.

**Studienteil A** stellt die Evaluation der Wirksamkeit der konzipierten Fahrerunterstützung unter zusätzlicher Variation der Dringlichkeit der Fahrerinformationen (visuell vs. visuell-auditiv) dar. Ziel ist hierbei zu untersuchen, inwieweit diese den Fahrer ohne die Notwendigkeit einer vorherigen Übungs- bzw. Instruktionsphase bei der Entschärfung der zeitkritischen Verkehrskonflikte unterstützt. Aus diesem Grund wurde dieser Studienteil zuerst durchgeführt.

**Studienteil B** zielt darauf ab, die Effekte falscher und unnötiger Alarmer zu untersuchen. Es wird davon ausgegangen, dass dieser Studienteil eine Lernphase im Umgang mit der Fahrerunterstützung benötigt, um die Effekte der Unzuverlässigkeit der Fahrerunterstützung untersuchen zu können. Um sicherzustellen, dass die Probanden die Funktionsweise der Fahrerunterstützung, inklusive der einzelnen Anzeigeelemente und Prüfsituationen, bereits kennengelernt hatten, wurde dieser Studienteil im Anschluss an Studienteil A durchgeführt.

**Studienteil C** wurde deshalb an letzter Stelle der Untersuchung durchgeführt, da davon ausgegangen wurde, dass die fehlerhafte Anzeige der Konfliktrichtung vor allem dann Folgen für die Fahrerreaktion hat, wenn Probanden sich darauf verlassen, dass die Konfliktrichtung immer korrekt angezeigt wird. In den vorangegangenen Studienteilen wurde diese immer korrekt angezeigt, um eine ausreichende Lernphase im Umgang mit den Fahrerinformationen zu gewährleisten.

Da in den drei Studienteilen unterschiedlichen Fragestellungen nachgegangen wurde, werden die Ergebnisse der drei Studienteile nacheinander berichtet. Dabei wird zuerst der

Versuchsplan vorgestellt, gefolgt von der Ergebnisdarstellung, bevor zum jeweils folgenden Studienteil übergegangen wird. Dieses Vorgehen dient in erster Linie dazu, das Verständnis des jeweils im Mittelpunkt stehenden Studienteils zu erleichtern.

Tabelle 35: Versuchsablauf.

Versuchsteil	Inhalt	Dauer (min)
Begrüßung und Instruktion	Probanden werden begrüßt und erhalten die Instruktion zur Fahraufgabe	5
Einfahren	Kurze Innenstadt-Strecke zur erneuten Gewöhnung an die Fahrsimulation	10
Hauptversuch Teil A: Wirksamkeit	Prüfparcours mit kritischen Verkehrsszenarien und korrekten Fahrerinformationen jeweils eine Sekunde vor dem letztmöglichen Warnzeitpunkt ( $t_{0+1s}$ )	20
Nachbefragung	Nachbefragung zur Akzeptanz der Mensch-Maschine-Schnittstelle	5
Hauptversuch Teil B: Falschinformationen	Prüfparcours mit kritischen Verkehrsszenarien und Fahrerinformationen jeweils eine Sekunde vor dem letztmöglichen Warnzeitpunkt ( $t_{0+1s}$ ). Bei Teilstichproben ist das Fahrerinformationssystem mit unnötigen oder falschen Informationen behaftet.	30
Nachbefragung	Nachbefragung zur Akzeptanz der Mensch-Maschine-Schnittstelle	5
Hauptversuch Teil C: Fehlerhafte Richtungsanzeige	Prüfparcours mit kritischen Verkehrsszenarien und Fahrerinformationen jeweils eine Sekunde vor dem letztmöglichen Warnzeitpunkt ( $t_{0+1s}$ ). Eine Teilstichprobe wird mit fehlerhaften Richtungsanzeigen konfrontiert, die andere Teilstichprobe erhält unspezifische Informationen.	30
Nachbefragung und Verabschiedung	Nachbefragung zur Akzeptanz der Mensch-Maschine-Schnittstelle	5

## 6.3 Studienteil A: Visuell vs. visuell-auditiv vs. Baseline

### 6.3.1 Methodik

#### 6.3.1.1 Versuchsplan

Die insgesamt 81 Probanden wurden per Zufall einer von drei Assistenzbedingungen zugewiesen: visuell-auditive Fahrerinformationen ( $n = 31$ )<sup>21</sup>, rein visuelle Fahrerinformationen ( $n = 30$ ) oder keine Fahrerunterstützung ( $n = 20$ , „Baseline“). Die Fahrerinformation bestand jeweils aus der Anzeige der Konfliktrichtung und wurde eine Sekunde vor dem letztmöglichen Warnzeitpunkt ( $t_{0+1s}$ ) dargeboten. Da die auditive Komponente der Fahrerunterstützung keinen Hinweis über die Konfliktrichtung enthält, sondern einen ungerichteten Hinweiston darstellt, wird an dieser Stelle bezüglich der Assistenzbedingungen von „Dringlichkeit“ gesprochen, und nicht von „Modalität“. Innerhalb einer ca. 20-minütigen Fahrt wurden die Probanden mit vier kritischen Verkehrsszenarien konfrontiert, wie sie in den vorhergehenden Studien I und II implementiert wurden. In der ersten Situation wurde den Fahrern von einem kreuzenden PKW die Vorfahrt genommen (Situation „Kreuzender PKW“). Um die Wirkung der Information im Erstkontakt untersuchen zu können (d.h. unter Ausschluss von Übungs- und Instruktionseffekten), wurde diese Situation von allen Probanden an erster Stelle absolviert. Im weiteren Streckenverlauf durchfuhren die Probanden drei weitere kritische Verkehrsszenarien: ein von parkenden

<sup>21</sup> Aufgrund von Simulator Sickness im weiteren Studienverlauf wurde eine Versuchsperson zusätzlich erhoben, was die ungleiche Verteilung der Versuchsgruppen mit visueller und visuell-auditiver Fahrerinformation in diesem Versuchsteil bedingt.

Fahrzeugen verdeckter, die Fahrbahn überschreitender Fußgänger („Überschreiten“), ein vorfahrtsmissachtender kreuzender Radfahrer („Kreuzender Radfahrer“) und ein vorfahrtsmissachtender abbiegender PKW („Abbiegender PKW“).

Die Szenarien wurden (bis auf das erste Szenario „Kreuzender PKW“) in permutierter Reihenfolge dargeboten, um Reihenfolgeneffekte zu kontrollieren. Die Darbietung der drei weiteren Szenarien hatte die Untersuchung der Fahrerreaktion bei grundsätzlicher Kenntnis des verwendeten Anzeigekonzepts zum Ziel. Die Ergebnisse von Erstkonfrontation und Folgesituationen werden im Ergebnisteil gemeinsam berichtet. Von Interesse ist ebenfalls, inwiefern sich in Bezug auf die Fahrerreaktion und Kritikalität Unterschiede zwischen der ersten Situation und den Folgesituationen finden.

### **6.3.1.2 Häufigkeit der Informationsdarbietung**

Alle Fahrer erhielten in den assistierten Bedingungen die Fahrerinformationen, da kein Fahrer so frühzeitig in der Anfahrt an den Konfliktpunkt bremste, dass eine Auslösung der Fahrerunterstützung unterdrückt worden wäre.

## **6.3.2 Ergebnisse**

### **6.3.2.1 Vorgehen bei der Ergebnisdarstellung**

Die zufallskritische Prüfung der Effekte erfolgt analog zu Studie II (siehe Abschnitt 4.3.1, logistische Regression bzw. between-within ANOVA (Profilanalyse) mit den Faktoren „Situation“ und „Assistenzbedingung“).

### **6.3.2.2 Missings**

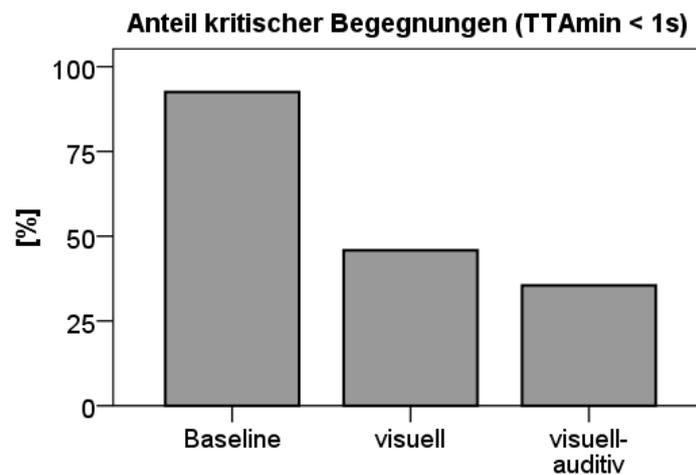
Wie aus Tabelle 36 ersichtlich wird, reagierten die meisten Probanden mit einer Bremsreaktion. In der ersten Prüfsituation („Kreuzender PKW“) reagierten in den Bedingungen mit und ohne Fahrerunterstützung etwa gleich viele Fahrer mit einer Bremsreaktion (Baseline: 90%, visuell: 87%, visuell-auditiv: 87%). Im weiteren Streckenverlauf reagierten nahezu alle Fahrer mit Fahrerunterstützung mit einer Bremsreaktion (visuell: 100%, visuell-auditiv: 99%), während Fahrer ohne Unterstützung vereinzelt nicht mit Bremsen auf die kritische Verkehrssituation reagierten (92% Bremsreaktionen). Der Unterschied zwischen den Assistenzbedingungen im Anteil der Fahrer, die keine Bremsreaktion zeigten, ist jedoch statistisch nicht signifikant ( $\chi^2 = 3.35$ ,  $df = 2$ ,  $p = .187$ ). Die Fahrer, die keine Bremsreaktion zeigten, können aufgrund der fehlenden Werte nicht in die Analyse der TTA bei Bremsbeginn eingehen.

Tabelle 36: Anteil der Probanden ohne Bremsreaktion.

Situation	Assistenzbedingung		
	Baseline	visuell	visuell-auditiv
Kreuzender PKW	3	4	4
Überschreiten	0	0	0
Kreuzender RF	3	0	0
Abbiegender PKW	5	0	1
N	20	30	31

### 6.3.2.3 Kritikalität

Abbildung 41 stellt den Anteil kritischer Begegnungen getrennt nach Assistenzbedingung dar. Während es in der nicht-assistierte Fahrt zu einem hohen Anteil an kritischen Begegnungen mit den jeweiligen Konfliktpartnern kommt (> 90%), fällt dieser in den assistierten Fahrten deutlich geringer aus.

Abbildung 41: Anteil kritischer Begegnungen (TTA<sub>min</sub> < 1s).

Eine Analyse des Anteils kritischer Begegnungen (TTA<sub>min</sub> < 1s vs. ≥ 1s, logistische Regression mit den Prädiktoren „Assistenzbedingung“, „Situation“ und der Interaktion „Assistenzbedingung\*Situation“) kommt zu folgendem Ergebnis: Sowohl visuell-auditive als auch rein visuelle Fahrerinformatoren senken den Anteil kritischer Begegnungen gegenüber der nicht-assistierte Fahrt unabhängig vom Versuchsszenario deutlich ab (signifikanter Prädiktor **Assistenzbedingung**, siehe Abbildung 41 und Tabelle 37). Hierbei wird ebenfalls ersichtlich, dass visuell-auditive Fahrerinformatoren zu einer stärkeren Verringerung des Anteils kritischer Begegnungen führen als rein visuelle Fahrerinformatoren (visuell-auditiv: OR = 0.015; visuell: OR = 0.030). Der Anteil kritischer Begegnungen hängt weiterhin vom Versuchsszenario ab (Prädiktor **Szenario**). Eine **Interaktion aus Assistenzbedingung und Szenario** findet sich hingegen nicht.

Tabelle 37: Logistische Regression; AV: Kritikalität (<1 s vs.  $\geq 1$  s); UVn: Assistenzbedingung, Situation, Interaktion aus Assistenzbedingung und Situation; Methode: Einschluss, Referenzkategorien: Baseline (Assistenzbedingung), Kreuzender PKW (Situation). Modelgüte:  $\chi^2 = 111.10$ ,  $df = 11$ ,  $p < .001$ .

Variable	B	Wald	df	p	OR
Assistenzbedingung	-	14.11	2	.001	-
<i>visuell-auditiv</i>	-4.18	14.10	1	<.001	0.015
<i>visuell</i>	-3.49	10.19	1	.001	0.030
Situation	-	0.69	3	.875	-
Interaktion	-	2.44	6	.875	-

### 6.3.2.4 Fahrerreaktion

#### 6.3.2.4.1 Time-to-arrival bei Bremsbeginn

Tabelle 38 stellt die inferenzstatistischen Ergebnisse zur Time-to-arrival bei Bremsbeginn dar. Insgesamt beginnen die Probanden in beiden Assistenzbedingungen deutlich früher mit dem Bremsen (*visuell*:  $M = 1.41$  s,  $SE = 0.06$ , *visuell-auditiv*:  $M = 1.74$  s,  $SE = 0.06$ ) als in der Bedingung ohne Fahrerunterstützung ( $M = 0.73$  s,  $SE = 0.10$ ; Effekt **Assistenzbedingung**). Bei welchem Zeitabstand die Probanden mit Bremsen beginnen, hängt weiterhin sowohl von der Assistenzbedingung, als auch vom Szenario ab (**Interaktion Szenario\*Assistenzbedingung**).

Tabelle 38: Time-to-arrival bei Bremsbeginn, ANOVA-Ergebnisse.

Effekt	F	df <sub>1</sub>	df <sub>2</sub>	p	$\eta^2$
Szenario	9.98	3	177	<.001	.15
Assistenzbedingung	36.30	2	59	<.001	.55
Interaktion	2.71	6	177	.015	.08

Abbildung 42 stellt den Zeitpunkt des Bremsbeginns in den verschiedenen Assistenzbedingungen getrennt nach den Prüfzuszenarien dar. Es wird deutlich, dass die Fahrer durch Fahrerinformationen mit und ohne auditive Komponente in allen Szenarien deutlich früher mit dem Bremsen beginnen als in der nicht-assistierten Fahrt (siehe Kontraste zwischen assistierten Fahrten und Baseline in Tabelle 39). Der mittlere Zeitvorteil des Bremsbeginns gegenüber der nicht-assistierten Fahrt liegt je nach Situation zwischen 0.50 s und 1.19 s (Mittlere Differenzen zur nicht-assistierten Fahrt: *visuell-auditiv/visuell*: Kreuzender PKW: 0.87 s / 0.50 s; Abbiegender PKW: 1.12 s / 0.75 s; Überschreiten: 0.83 s / 0.68 s; Kreuzender Radfahrer: 1.30 s / 1.01 s). Weiterhin bremsen die Fahrer in nahezu allen Szenarien bei *visuell-auditiver* Fahrerunterstützung gegenüber der rein *visuellen* Assistenz signifikant früher. Nur im Szenario „Überschreiten“ findet sich dieser Unterschied zwischen den beiden Varianten der Fahrerunterstützung nicht (siehe Kontraste zwischen *visueller* und *visuell-auditiver* Fahrerunterstützung in Tabelle 39).

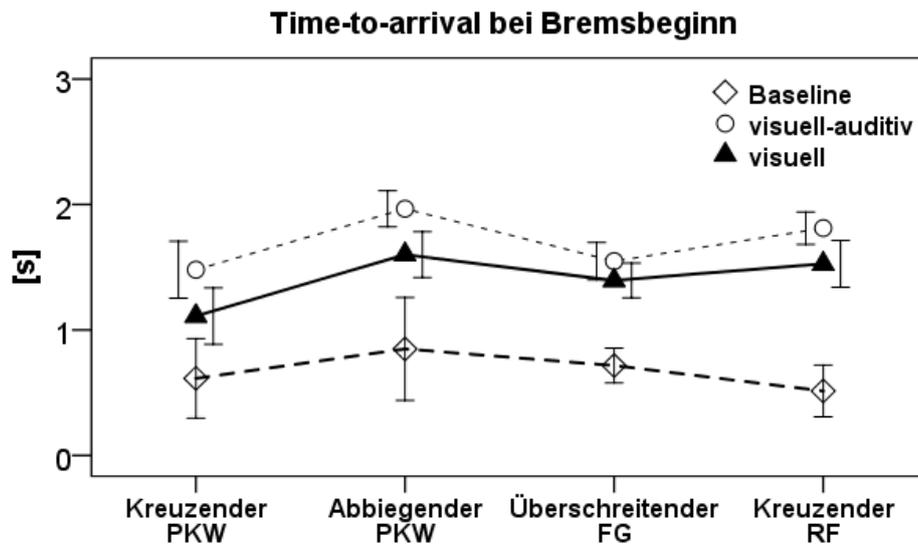


Abbildung 42: Time-to-arrival bei Bremsbeginn; dargestellt sind Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Tabelle 39: Time-to-arrival bei Bremsbeginn, szenarienspezifische ANOVA Ergebnisse und geplante Kontraste zwischen den Assistenzbedingungen.

Szenario	Effekt	F	df <sub>1</sub>	df <sub>2</sub>	p	η <sup>2</sup>
Kreuzender PKW	Haupteffekt Assistenzbedingung	11.71	2	67	<.001	.26
	Kontrast: Visuell-auditiv vs. Baseline				<.001	
	Kontrast: Visuell vs. Baseline				.008	
	Kontrast: Visuell vs. visuell-auditiv				.023	
Abbiegender PKW	Haupteffekt Assistenzbedingung	23.54	2	71	<.001	.40
	Kontrast: Visuell-auditiv vs. Baseline				<.001	
	Kontrast: Visuell vs. Baseline				<.001	
	Kontrast: Visuell vs. visuell-auditiv				.008	
Überschreiten	Haupteffekt Assistenzbedingung	32.93	2	78	<.001	.46
	Kontrast: Visuell-auditiv vs. Baseline				<.001	
	Kontrast: Visuell vs. Baseline				<.001	
	Kontrast: Visuell vs. visuell-auditiv				.108	
Kreuzender Radfahrer	Haupteffekt Assistenzbedingung	52.80	2	75	<.001	.59
	Kontrast: Visuell-auditiv vs. Baseline				<.001	
	Kontrast: Visuell vs. Baseline				<.001	
	Kontrast: Visuell vs. visuell-auditiv				.011	

#### 6.3.2.4.2 Maximale Bremspedalstellung

Tabelle 40 macht deutlich, dass die maximale Bremspedalstellung sowohl vom Szenario als auch von der Assistenzbedingung abhängt (Interaktion **Assistenzbedingung\*Szenario**). Die Fahrer bremsen bei rein visueller Anzeige stärker als bei visuell-auditiver Information (Effekt **Assistenzbedingung**, siehe Tabelle 40 und Kontraste zwischen visueller und visuell-auditiver Fahrerunterstützung in Tabelle 41), was durch die oben genannte spätere Bremsreaktion bei rein visuellen Anzeigen erklärt werden kann. Die mittlere Erhöhung der maximalen Bremspedalstellung gegenüber visuell-auditiver Unterstützung liegt über alle Szenarien betrachtet bei ca. 20% (mittlere Erhöhung der maximalen Bremspedalstellung gegenüber visuell-auditiver Information in den einzelnen Szenarien: Kreuzender PKW: 14%, abbiegender PKW: 13%, überschreitender Fußgänger: 29%; kreuzender Radfahrer: 23%).

Eine Reduktion der Bremsstärke gegenüber der nicht-assistierten Fahrt findet sich ausschließlich bei visuell-auditiver Fahrerunterstützung in den Szenarien „Überschreiten“ (mittlere Reduktion der maximalen Bremspedalstellung: ca. 32%) und „Kreuzender Radfahrer“ (mittlere Reduktion der maximalen Bremspedalstellung: ca. 28%, siehe Abbildung 43 bzw. Kontraste zwischen assistierten und nicht-assistierter Fahrt in Tabelle 41).

Tabelle 40: Maximale Bremspedalstellung; ANOVA Ergebnisse.

Effekt	F	df <sub>1</sub>	df <sub>2</sub>	p	$\eta^2$
Szenario	47.57	3	234	<.001	0.38
Assistenzbedingung	10.35	2	78	<.001	0.21
Interaktion	3.07	6	234	.007	0.07

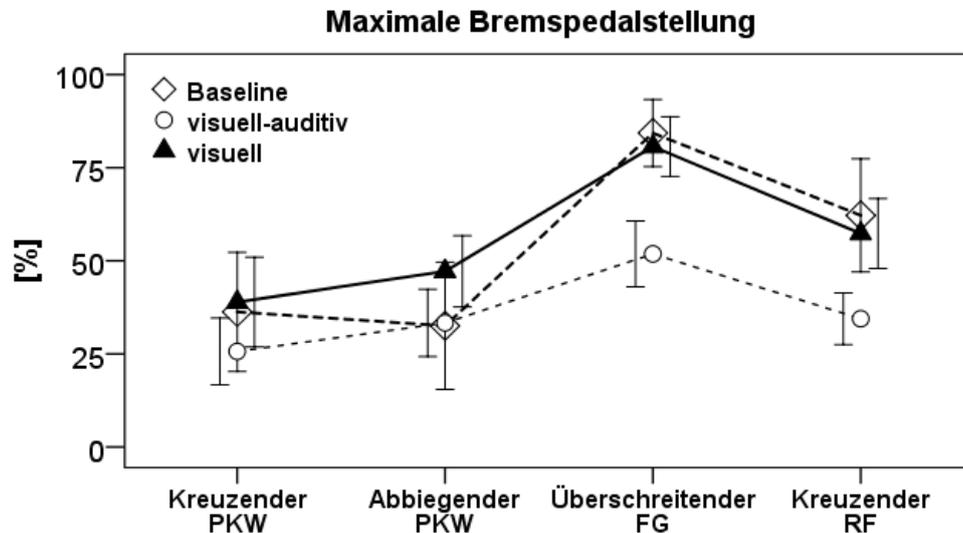


Abbildung 43: Maximale Bremspedalstellung; dargestellt sind Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Tabelle 41: Maximale Bremspedalstellung, szenarienspezifische ANOVA Ergebnisse und geplante Kontraste zwischen den Assistenzbedingungen.

Szenario	Effekt	F	df <sub>1</sub>	df <sub>2</sub>	p	$\eta^2$
Kreuzender PKW	Haupteffekt Assistenzbedingung	1.63	2	78	.203	.04
	Kontrast: Visuell-auditiv vs. Baseline				.222	
	Kontrast: Visuell vs. Baseline				.761	
	Kontrast: Visuell vs. visuell-auditiv				.089	
Abbiegender PKW	Haupteffekt Assistenzbedingung	2.37	2	78	.100	.06
	Kontrast: Visuell-auditiv vs. Baseline				.924	
	Kontrast: Visuell vs. Baseline				.077	
	Kontrast: Visuell vs. visuell-auditiv				.059	
Überschreiten	Haupteffekt Assistenzbedingung	18.30	2	78	<.001	.32
	Kontrast: Visuell-auditiv vs. Baseline				<.001	
	Kontrast: Visuell vs. Baseline				.568	
	Kontrast: Visuell vs. visuell-auditiv				<.001	
Kreuzender Radfahrer	Haupteffekt Assistenzbedingung	9.60	2	78	<.001	.20
	Kontrast: Visuell-auditiv vs. Baseline				<.001	
	Kontrast: Visuell vs. Baseline				.503	
	Kontrast: Visuell vs. visuell-auditiv				.001	

### 6.3.2.5 Urteile

#### 6.3.2.5.1 Kritikalitätseinschätzung

Wie aus Tabelle 42 hervorgeht, hängen die Kritikalitätsurteile der Probanden von Situation und Assistenzbedingung ab (Interaktion **Szenario\*Assistenzbedingung**). Die Einschätzungen der Situationskritikalität sind, getrennt nach Szenario, in Abbildung 44 dargestellt.

Tabelle 42: Kritikalitätseinschätzung; ANOVA Ergebnisse.

Effekt	F	df <sub>1</sub>	df <sub>2</sub>	p	$\eta^2$
Szenario	8.15	3	234	<.001	0.10
Assistenzbedingung	16.82	2	78	<.001	0.30
Interaktion	9.19	6	234	<.001	0.19

Im ersten Versuchsszenario („Kreuzender PKW“) unterscheiden sich die Urteile zwischen den Assistenzbedingungen nicht signifikant, wohingegen sich in den Folgesituationen diesbezüglich Unterschiede finden (Effekt **Assistenzbedingung**, siehe Tabelle 43). Bei den Folgesituationen verringern visuell-auditive Informationen die eingeschätzte Kritikalität gegenüber der nicht-assistierten Fahrt in allen Szenarien. Bei rein visuellen Informationen nehmen die Urteile in allen Szenarien bis auf die Situation „Abbiegender PKW“ ab (siehe Kontraste zwischen assistierten und nicht-assistierten Fahrten in Tabelle 43). Ein Unterschied zwischen visueller und visuell-audativer Fahrerunterstützung zeigt sich hingegen in keinem der untersuchten Szenarien (siehe Kontraste zwischen visueller und visuell-audativer Fahrerunterstützung in Tabelle 43).

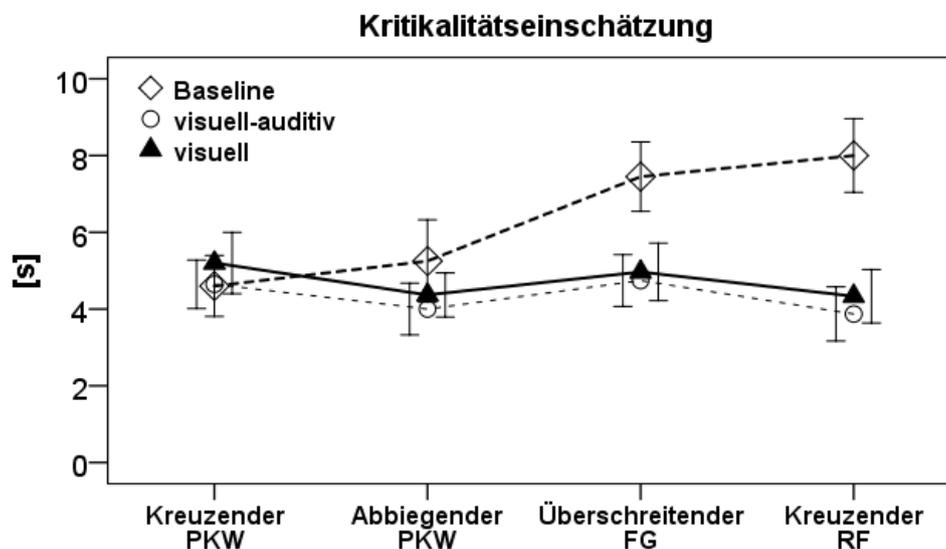


Abbildung 44: Kritikalitätseinschätzung; dargestellt sind Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Tabelle 43: Kritikalitätseinschätzung; szenarienspezifische ANOVA Ergebnisse und geplante Kontraste zwischen den Assistenzbedingungen.

Szenario	Effekt	F	df <sub>1</sub>	df <sub>2</sub>	p	$\eta^2$
Kreuzender PKW	Haupteffekt Assistenzbedingung	0.88	2	78	.420	.02
	Kontrast: Visuell-auditiv vs. Baseline				.934	
	Kontrast: Visuell vs. Baseline				.273	
	Kontrast: Visuell vs. visuell-auditiv				.254	
Abbiegender PKW	Haupteffekt Assistenzbedingung	2.78	2	78	.068	.07
	Kontrast: Visuell-auditiv vs. Baseline				.022	
	Kontrast: Visuell vs. Baseline				.105	
	Kontrast: Visuell vs. visuell-auditiv				.445	
Überschreiten	Haupteffekt Assistenzbedingung	13.78	2	78	<.001	.26
	Kontrast: Visuell-auditiv vs. Baseline				<.001	
	Kontrast: Visuell vs. Baseline				<.001	
	Kontrast: Visuell vs. visuell-auditiv				.650	
Kreuzender Radfahrer	Haupteffekt Assistenzbedingung	31.04	2	78	<.001	.44
	Kontrast: Visuell-auditiv vs. Baseline				<.001	
	Kontrast: Visuell vs. Baseline				<.001	
	Kontrast: Visuell vs. visuell-auditiv				.354	

### 6.3.2.5.2 Nützlichkeitseinschätzung

Hinsichtlich der Nützlichkeitseinschätzung findet sich kein signifikanter Unterschied zwischen den **Assistenzbedingungen**. Die Probanden schätzen visuell-auditive ( $M = 10.88$ ,  $SE = 0.44$ ) und rein visuelle ( $M = 10.59$ ,  $SE = 0.44$ ) Fahrerinformationen als vergleichbar nützlich ein (siehe Tabelle 44). Eine **Interaktion mit dem Versuchsszenario** findet sich ebenfalls nicht. Lediglich die Einschätzung der Urteile zwischen den Prüfzuszenarien unterscheidet sich signifikant (Effekt **Szenario**).

Tabelle 44: Nützlichkeitseinschätzung, ANOVA Ergebnisse.

Effekt	F	df <sub>1</sub>	df <sub>2</sub>	p	$\eta^2$
Szenario	5.78	3	177	.001	0.09
Assistenzbedingung	0.21	1	59	.646	0.00
Interaktion	0.12	3	177	.947	0.00

### 6.3.2.5.3 Nachbefragung

Wie in der Befragung zur Nützlichkeit der Fahrerunterstützung während der Fahrt finden sich bei den Nachbefragungsergebnissen weitestgehend keine signifikanten Unterschiede zwischen den Unterstützungsvarianten (siehe Abbildung 45 bzw. inferenzstatistische Ergebnisse in Tabelle 45). Visuell-auditive und visuelle Fahrerinformationen werden in gleicher Weise als

- wenig beanspruchend („*Ease of Use*“, niedrige Zustimmung bspw. in den Aussagen „*Das Lesen der Information war anstrengend*“ oder „*Die Information war störend*“),
- gebrauchssicher („*Safety of Use*“, niedrige Zustimmung in den Aussagen „*Die Information hat vom Fahren abgelenkt*“ und „*Durch die Information habe ich andere Verkehrsteilnehmer gefährdet*“) und
- nützlich eingeschätzt („*Usefulness*“; hohe Zustimmung in Items wie bspw. „*Durch die Information wurde das Fahren sicherer*“, „*Ich würde das Informationssystem im Alltag nutzen*“ oder „*Die Information war hilfreich*“ usw.).

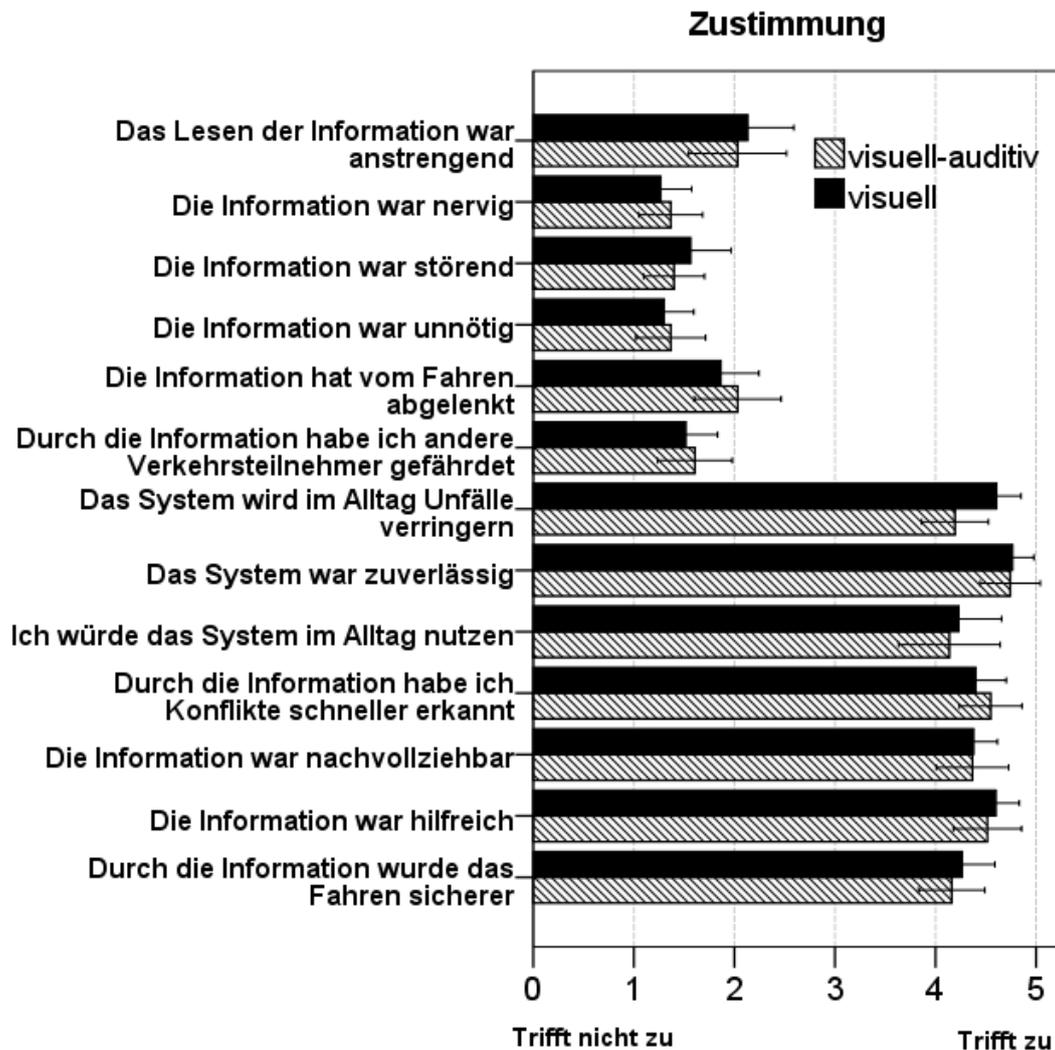


Abbildung 45: Nachbefragungsergebnisse. Dargestellt sind Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

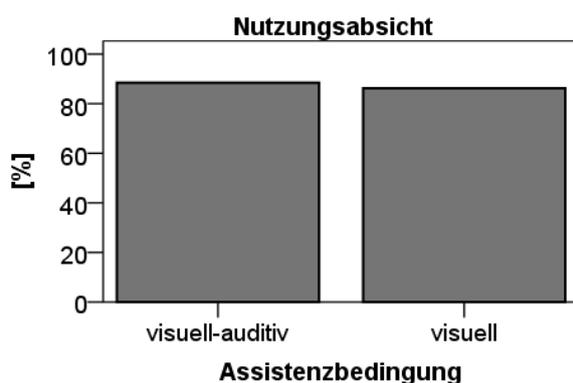
Einzig im Item „Das Informationssystem wird im Alltag Unfälle verringern“ findet sich ein Unterschied zwischen den Einschätzungen von visuellen und visuell-auditiven Fahrerinformationen. Die Zustimmung zu diesem Item ist bei rein visuellen Fahrerinformationen höher als bei visuell-auditiven Fahrerinformationen (siehe Tabelle 45).

Tabelle 45: Nachbefragungsergebnisse, ANOVA mit der unabhängigen Variable „Assistenzbedingung“ und den Probandeneinschätzungen als abhängige Variable.

Aspekt	Frage	F	df <sub>1</sub>	df <sub>2</sub>	p	$\eta^2$
"Ease of Use"	Das Lesen der Information war anstrengend	0.10	1	59	.759	0.00
	Die Information war nervig	0.21	1	58	.646	0.00
	Die Information war störend	0.46	1	58	.500	0.01
	Die Information war unnötig	0.09	1	58	.766	0.00
"Safety of Use"	Die Information hat vom Fahren abgelenkt	0.35	1	58	.555	0.01
	Durch die Information habe ich andere Verkehrsteilnehmer gefährdet	0.14	1	55	.706	0.00
"Usefulness"	Das Informationssystem wird im Alltag Unfälle verringern	4.04	1	57	.049	0.07
	Das System war zuverlässig	0.02	1	59	.891	0.00
	Ich würde das System im Alltag nutzen	0.09	1	57	.768	0.00
	Durch die Information habe ich Konflikte schneller erkannt	0.49	1	59	.489	0.01
	Die Information war nachvollziehbar	0.00	1	57	.953	0.00
	Die Information war hilfreich	0.17	1	59	.680	0.00
	Durch die Information wurde das Fahren sicherer	0.22	1	59	.643	0.00

Nach der Fahrt wurden die Probanden im Hinblick auf ihre Nutzungsabsicht befragt („Würden Sie das System im Alltag nutzen?“). Insgesamt kann eine hohe Nutzungsabsicht in beiden Systemauslegungen (visuell-auditiv: 86%; visuell: 88%) berichtet werden (siehe Abbildung 46). Zwischen visuell-auditiven und rein visuellen Informationen gibt es hierbei keinen Unterschied ( $\chi^2$ -Test auf Unterschiede in der Zustimmungshäufigkeit:  $\chi^2 = 0.63$ ,  $df = 1$ ,  $p = .802$ ). Als Gründe für die fehlende Nutzungsabsicht bei den wenigen Probanden, welche die Fahrerunterstützung nicht nutzen würden, wurde genannt:

- drei Probanden geben an, dass die Gefahr eines zu starken Vertrauens auf das Informationssystem zu groß ist (z.B. „Bin mir unsicher, ob wirklich alle Gefahren erkannt werden. Würde das System daher eher nicht nutzen“).
- zwei Probanden geben an, dass das Informationssystem sie zu stark ablenken würde (z.B. „Lenkt ab, weil man sich auf das System konzentriert.“).
- ein Proband gibt an, dass der Informationszeitpunkt zu knapp gewählt sei („Ich würde es nicht nutzen, weil es mich nicht früh genug warnt.“).
- ein Proband gibt an, dass ein solches System zu viel kosten würde („Kosten? Wohl eher nicht.“).



Assistenzbedingung	nein	ja	keine Angabe	N
visuell-auditiv	4	25	2	31
visuell	3	23	4	30

Abbildung 46: Nachbefragungsergebnisse zur Nutzungsabsicht.

## 6.4 Studienteil B: Falsche und unnötige Alarme

### 6.4.1 Methodik

#### 6.4.1.1 Versuchsdesign

Im zweiten Studienteil wurden die Effekte verschiedener Arten von Falschinformationen (d.h. Informationsausgabe obwohl kein Verkehrskonflikt vorliegt) auf die Fahrerreaktion und Akzeptanz untersucht. Die Probanden durchfuhren eine ca. 30-40 minütige Simulatorstrecke, bei der sie in unregelmäßigen Abständen mit den im ersten Studienteil verwendeten kritischen Verkehrsszenarien konfrontiert wurden. Die einzelnen Szenarien unterschieden sich hierbei jeweils in oberflächlichen Merkmalen wie Straßentexturen, Randbebauung und peripherem Umgebungsverkehr. Unter Beibehaltung der jeweiligen Assistenzbedingung aus dem ersten Studienteil (visuell-auditiv oder rein visuelle Fahrerinformation) wurden Teilstichproben von jeweils  $n = 10$  Probanden per Zufall unterschiedlichen Zuverlässigkeitsbedingungen zugeteilt (siehe Tabelle 46). Die Fahrer wurden entweder mit einem stets zuverlässigen Informationssystem unterstützt (100% Zuverlässigkeit), mit einem Informationssystem mit teilweise falschen Informationen (= „FI“, Fahrerinformationen, obwohl kein Konfliktpartner anwesend war; 60% Zuverlässigkeit) oder unnötigen Informationen (= „UI“, Fahrerinformation, obwohl sich keine kritische Situation entwickelt, d.h. Konfliktpartner hält in Anfahrt an gemeinsamen Konfliktpunkt an; Zuverlässigkeit 60%).

Alle Probanden wurden innerhalb der Versuchsstrecke dreimal mit den vier Prüfzenarien aus Studienteil A konfrontiert, wobei in den Bedingungen mit unzuverlässigem Informationssystem jeweils zwei zusätzliche Situationen mit falschen bzw. unnötigen Informationen pro Szenario dargeboten wurden (entsprechend einer Zuverlässigkeit von 60%; drei Prüfsituationen und zwei Situationen mit falschen oder unnötigen Informationen pro Szenario). Die Probanden in der Bedingung mit stets korrekter Fahrerunterstützung und in der nicht-assistierten Bedingung durchfuhren statt Situationen mit falschen bzw. unnötigen Informationen Füllsituationen, so dass insgesamt von allen Probanden eine vergleichbare Simulatorstrecke durchfahren wurde (in Bezug auf Streckenlänge und Anzahl an durchfahrenen Situationen).

Tabelle 46: Versuchsplan, Studienteil II.

	Zuverlässigkeit		
	100%	60% mit falschen Informationen (FI)	60% mit unnötigen Informationen (UI)
<b>Assistenzbedingungen</b>			
Visuell-auditiv	10	10	10
Visuell	10	10	10
Baseline (ohne Info)		20	

Da zum Versuchszeitpunkt keine Abschätzungen über die tatsächliche Systemzuverlässigkeit einer solchen Fahrerunterstützung im Realverkehr vorlagen, wurden die Zuverlässigkeitsraten von gängigen Grenzwerten aus der allgemeinen Automationsliteratur, ab denen deutliche Einschränkungen der Wirksamkeit unzuverlässiger Assistenzsysteme zu beobachten sind, abgeleitet (siehe Wickens und Dixon, 2007, für ein

diesbezügliches Review). Ein Proband konnte aufgrund von Übelkeit den Versuch nicht zu Ende führen, weswegen sich die Gesamtstichprobe auf  $N = 80$  reduziert.

#### 6.4.1.2 Häufigkeit der Informationsdarbietung

Die Fahrerinformation wurde in allen bis auf eine Situation („Überschreiten“, visuell-auditive Fahrerunterstützung mit falschen Informationen) von allen Probanden ausgelöst.

#### 6.4.1.3 Missings

Der Anteil an Situationen, in denen die Fahrer mit einem Bremsengriff reagierten, ist in Tabelle 47 dargestellt. Im Gegensatz zur nicht-assistierten Fahrt bremsen die Probanden bei assistierten Fahrten in nahezu allen Situationen.

Tabelle 47: Übersicht über Anteil der Fahrten mit Bremsreaktion des Fahrers. Jede Situation wurde von den Fahrern dreimalig durchfahren.

Situation	Assistenzbedingung	Zuverlässigkeit	N	Gesamt-Trials	N Bremsreaktion	%
Abbiegender PKW	Baseline	-	20	60	47	78
	visuell-auditiv	100%	10	30	27	90
	visuell-auditiv	60% (FI)	10	30	29	97
	visuell-auditiv	60% (UI)	10	30	29	97
	visuell	100%	10	30	30	100
	visuell	60% (FI)	10	30	29	97
	visuell	60% (UI)	10	30	30	100
Kreuzender PKW	Baseline	-	20	60	53	88
	visuell-auditiv	100%	10	30	28	93
	visuell-auditiv	60% (FI)	10	30	29	97
	visuell-auditiv	60% (UI)	10	30	28	93
	visuell	100%	10	30	30	100
	visuell	60% (FI)	10	30	29	97
	visuell	60% (UI)	10	30	30	100
Überschreitender FG	Baseline	-	20	60	60	100
	visuell-auditiv	100%	10	30	29	97
	visuell-auditiv	60% (FI)	10	30	29	97
	visuell-auditiv	60% (UI)	10	30	29	97
	visuell	100%	10	30	30	100
	visuell	60% (FI)	10	30	30	100
	visuell	60% (UI)	10	30	30	100
Kreuzender RF	Baseline	-	20	60	58	97
	visuell-auditiv	100%	10	30	30	100
	visuell-auditiv	60% (FI)	10	30	30	100
	visuell-auditiv	60% (UI)	10	30	30	100
	visuell	100%	10	30	30	100
	visuell	60% (FI)	10	30	30	100
	visuell	60% (UI)	10	30	30	100

## 6.4.2 Ergebnisse

### 6.4.2.1 Vorgehen bei der Ergebnisdarstellung

Von zentraler Bedeutung bei der Ergebnisanalyse sind die Effekte der Zuverlässigkeit der Fahrerinformationen auf die Fahrerreaktion und die Kritikalität. Hierbei wird der Frage nachgegangen, inwiefern sich in Abhängigkeit von der Assistenzbedingung (visuell vs. visuell-auditiv) Einschränkungen in der Wirksamkeit und Akzeptanz durch falsche und unnötige Informationen verglichen mit der Bedingung mit zuverlässigen Informationen ergeben. Aufgrund des Versuchsdesigns (2x3-Design mit Zusatzbedingung „Baseline“) wird bei der Analyse ein zweistufiges Vorgehen gewählt.

In einem ersten Analyse-Schritt werden die assistierten Fahrten untereinander verglichen. Das Vorgehen ist analog zum ersten Studienteil (A): Es wird eine logistische Regression mit dem Anteil an kritischen Begegnungen als abhängige Variable sowie mehrere between-within ANOVAs mit dem within-Faktor „Szenario“, den between-Faktoren „Zuverlässigkeit“ und „Assistenzbedingung“ und den stetigen Parametern (z.B. TTA bei Bremsbeginn) als abhängige Variablen durchgeführt. Zur Berechnung der ANOVAs wurden die Variablen aus der dreimaligen Konfrontation mit den vier Prüfscenarien über die Fahrer gemittelt, da andernfalls die Zellbesetzungen aufgrund von einzelnen fehlenden Werten für eine inferenzstatistische Auswertung zu gering gewesen wären<sup>22</sup>.

In einem zweiten Analyse-Schritt werden jeweils Kontraste zwischen den einzelnen Bedingungen und der Baseline-Fahrt berechnet, um die Unterschiede zur nicht-assistierten Fahrt zu analysieren. Dies geschieht deswegen, da das Studiendesign bei Einbezug der nicht-assistierten Fahrt nicht orthogonal ist (d.h. die Effekte der Assistenzbedingung und Zuverlässigkeit können nicht gleichzeitig in derselben Analyse betrachtet werden).

Da die verschiedenen Versuchsszenarien vor allem dazu dienen, die Generalisierbarkeit der Ergebnisse über verschiedene Situationen hinweg zu prüfen, werden Haupteffekte des Versuchsszenarios deshalb zwar berichtet, aber nicht ausgeführt. Falls sich Interaktionen mit den Versuchsszenarien ergeben, liefert dies einen Hinweis auf die Abhängigkeit des jeweiligen Ergebnis von den untersuchten Szenarien. In diesem Fall werden die Ergebnisse berichtet.

### 6.4.2.2 Kritikalität

Während 78% der Situationen ohne Fahrerunterstützung in kritischen Begegnungen münden, liegt der Anteil kritischer Begegnungen in den assistierten Fahrten zwischen 9% und 14% (100% Zuverlässigkeit: 9%, 60% Zuverlässigkeit mit falschen Informationen: 14%, 60% Zuverlässigkeit mit unnötigen Informationen: 8%). Eine zusammenfassende Darstellung des Anteils kritischer Begegnungen in den Fahrten mit Fahrerunterstützung, getrennt nach Assistenzbedingung und Zuverlässigkeit findet sich in Abbildung 47.

---

<sup>22</sup> Da in die ANOVA mit Messwiederholung nur solche Probanden eingehen, bei denen für alle Situationen ein vollständiges Daten-Set vorliegt, siehe Tabelle 47.

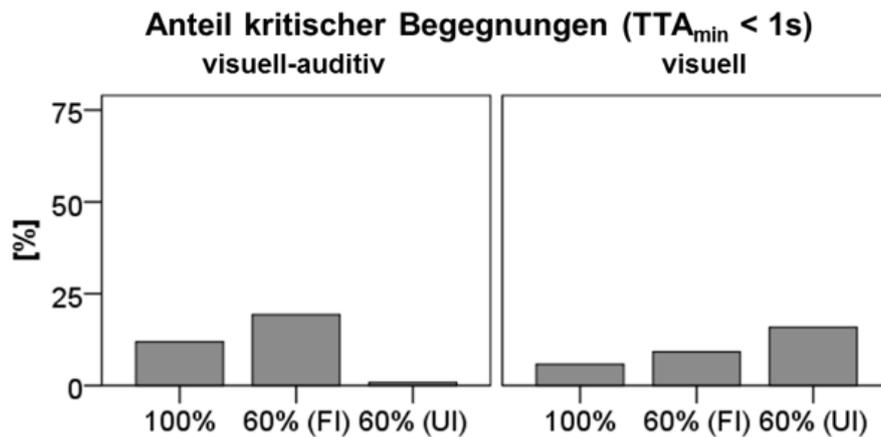


Abbildung 47: Anteil kritischer Begegnungen ( $TTA_{\min} < 1s$ ); getrennte Darstellung nach Zuverlässigkeit und Assistenzbedingung.

Zum Vergleich des Anteils kritischer Begegnungen innerhalb der Versuchsbedingungen mit Fahrerunterstützung wurde eine logistische Regression durchgeführt (AV:  $TTA_{\min} < 1s$  vs.  $TTA_{\min} \geq 1s$ , Prädiktoren: Assistenzbedingung, Szenario, Zuverlässigkeit). Wie aus Tabelle 48 ersichtlich wird, hängt der Anteil kritischer Begegnungen von der **Zuverlässigkeit** ab: Die Chance, dass eine kritische Begegnung stattfindet, ist in der Bedingung mit falschen Informationen, nicht aber mit unnötigen Informationen gegenüber der Bedingung mit 100% Zuverlässigkeit erhöht (Effekt **Zuverlässigkeit**). Weiterhin ist die Interaktion aus **Zuverlässigkeit und Assistenzbedingung** signifikant. Eine Wiederholung der logistischen Regression getrennt nach Assistenzbedingung zeigt, dass der Anteil kritischer Begegnung durch falsche Informationen in der visuell-auditiven Bedingung erhöht ist (Wald  $X^2 = 51.43$ ,  $df = 11$ ,  $p < .001$ , Kontraste: 100% vs. 60%(FI):  $p = .016$ ,  $OR = 4.38$ , 100% vs. 60%(UI):  $p = .119$ ,  $OR = 0.17$ ), während sich in der Bedingung mit rein visueller Fahrerunterstützung kein Unterschied zwischen den Zuverlässigkeits-Bedingungen findet (Wald  $X^2 = 16.41$ ,  $df = 11$ ,  $p = .127$ ).

Um abzuschätzen, inwieweit sich trotz Unzuverlässigkeit der Fahrerinformationen eine Wirksamkeit der Fahrerunterstützung im Hinblick auf eine Reduktion kritischer Begegnungen verglichen mit der nicht-assistierten Fahrt ergibt, wurde pro Assistenzbedingung (visuell und visuell-auditiv) eine logistische Regression (AV:  $TTA_{\min} < 1s$  vs.  $TTA_{\min} \geq 1s$ , Prädiktor: Zuverlässigkeit) durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 49 dargestellt. In beiden Assistenzbedingungen findet sich in allen Zuverlässigkeitsbedingungen eine Reduktion im Anteil kritischer Begegnungen gegenüber der nicht-assistierten Fahrt.

Tabelle 48: Logistische Regression; AV: Kritikalität (<1 s vs.  $\geq 1$  s); UVn: Assistenzbedingung, Situation, Zuverlässigkeit, 2- und 3-fach Interaktionen; Methode: Einschluss, Referenzkategorien: visuell-auditiv (Assistenzbedingung), 100% Zuverlässigkeit (Zuverlässigkeit). Modelgüte:  $\chi^2 = 67.86$ ,  $df = 23$ ,  $p < .001$ .

Prädiktor	B	Wald	df	p	OR
Assistenzbedingung	-1.76	2.43	1	.119	-
Zuverlässigkeit	-	12.36	2	.002	-
60% FI	1.48	5.83	1	.016	4.38
60% UI	-1.76	2.43	1	.119	0.17
Assistenzbedingung*Zuverlässigkeit	-	8.89	2	.012	-
Szenario	-	1.55	3	.671	-
Szenario* Zuverlässigkeit	-	3.75	6	.710	-
Szenario* Assistenzbedingung	-	2.34	3	.525	-
Assistenzbedingung * Szenario * Zuverlässigkeit	-	0.25	6	1.000	-

Tabelle 49: Logistische Regression; AV: Kritikalität (<1 s vs.  $\geq 1$  s); UVn: Zuverlässigkeit; Methode: Einschluss, Referenzkategorien: Baseline. Modelgüte visuell-auditiv:  $\chi^2 = 321.13$ ,  $df = 3$ ,  $p < .001$ ; visuell:  $\chi^2 = 304.13$ ,  $df = 3$ ,  $p < .001$ . Eine Darstellung der relativen Häufigkeit kritischer Begegnungen findet sich in Abbildung 47.

Assistenzbedingung	Prädiktor	B	Wald	df	p	OR
Visuell-auditiv	Zuverlässigkeit	-	174.95	3	<.001	-
	100%	-3.26	101.52	1	<.001	0.038
	60% (FI)	-2.67	91.34	1	<.001	0.070
	60% (UI)	-6.02	35.06	1	<.001	0.002
Visuell	Zuverlässigkeit	-	208.67	3	<.001	-
	100%	-4.02	91.95	1	<.001	0.018
	60% (FI)	-3.53	100.52	1	<.001	0.029
	60% (UI)	-2.91	97.81	1	<.001	0.055

### 6.4.2.3 Fahrerreaktion

#### 6.4.2.3.1 Time-to-arrival bei Bremsbeginn

Abbildung 48 stellt die **Time-to-arrival bei Bremsbeginn** dar. Die inferenzstatistische Analyse (siehe Tabelle 50) zeigt einen marginal signifikanten Effekt der **Zuverlässigkeit**. Falsche, nicht aber unnötige Informationen führen dazu, dass die Fahrer tendenziell bei kleinerem Zeitabstand zum Konfliktpunkt mit dem Bremsen beginnen (Kontrast 100%-60% (FI): Differenz = -0.10 s,  $p = .104$ ; 100%-60% (UI): Differenz = 0.04 s,  $p = .479$ ). Die Minderung der TTA bei Bremsbeginn geht hierbei auf die Bedingung mit visuell-auditiven Fahrerinformationen zurück (Interaktion **Assistenzbedingung\*Zuverlässigkeit**). Nur in dieser Bedingung beginnen die Probanden verglichen mit den übrigen Zuverlässigkeitsbedingungen in der Bedingung mit falschen Informationen bei kleinerem Zeitabstand mit dem Bremsen (Effekt Zuverlässigkeit:  $F(2,26) = 4.21$ ,  $p = .026$ ,  $\eta^2 = .24$ ; Kontrast 60% (FI)-Mittelwert: Differenz = -0.13 s,  $p = .022$ ), während dies in der Bedingung mit rein visuellen Fahrerinformationen nicht der Fall ist (Effekt Zuverlässigkeit:  $F(2,27) = 0.63$ ,  $p = .543$ ,  $\eta^2 = .04$ ). Weiterhin wird ersichtlich, dass die Fahrer mit visuell-auditiver Fahrerinformation früher in der Anfahrt an den Konfliktpunkt mit dem Bremsen beginnen als mit rein visueller Unterstützung (visuell-auditiv:  $M = 1.96$  s,  $SE = 0.03$ ; visuell:  $M = 1.85$  s,  $SE = 0.03$ , Effekt **Assistenzbedingung**). Eine **Interaktion mit dem Szenario** findet sich weder mit der Assistenz- noch mit der Zuverlässigkeitsbedingung.

Trotz des späteren Bremsbeginns bei falschen Informationen bremsen die Fahrer in allen Bedingungen mit Fahrerunterstützung, unabhängig von deren Zuverlässigkeit, im Mittel ca. 1 s früher als die Fahrer in der Bedingung ohne Fahrerunterstützung (siehe Tabelle 51).

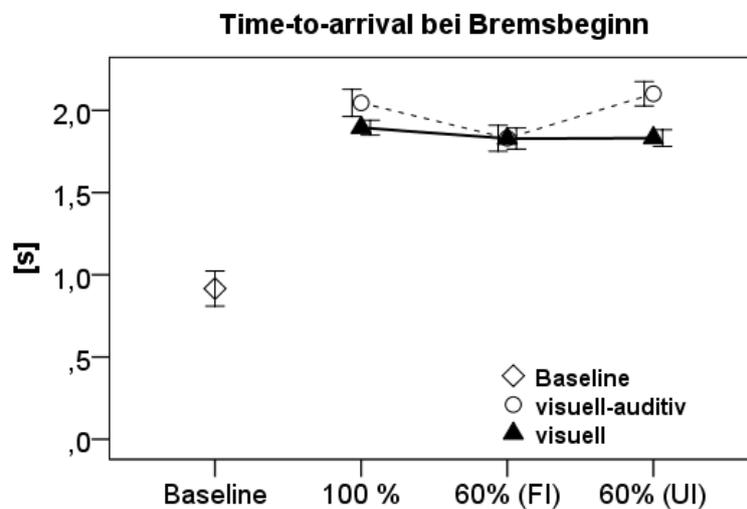


Abbildung 48: Time-to-arrival bei Bremsbeginn; dargestellt sind Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Tabelle 50: Time-to-arrival bei Bremsbeginn; ANOVA Ergebnisse.

Effekt	F	df <sub>1</sub>	df <sub>2</sub>	p	η <sup>2</sup>
Assistenzbedingung	5.23	1	53	.026	0.09
Zuverlässigkeit	3.03	2	53	.057	0.10
Zuverlässigkeit * Assistenzbedingung	3.03	2	53	.057	0.10
Szenario	28.77	3	51	<.001	0.63
Szenario * Zuverlässigkeit	0.98	6	104	.443	0.05
Szenario * Assistenzbedingung	1.03	3	51	.389	0.06
Szenario * Zuverlässigkeit * Assistenzbedingung	1.11	6	104	.363	0.06

Tabelle 51: Time-to-arrival bei Bremsbeginn; geplante Kontraste zur Baseline.

Assistenzbedingung	Zuverlässigkeit	TTA <sub>Bremsbeginn</sub>		
		Differenz zur Baseline	Standardfehler	p
visuell-auditiv	100%	1.06	0.14	<.001
	60% FI	0.93	0.13	<.001
	60% UI	1.21	0.13	<.001
visuell	100%	1.00	0.13	<.001
	60% FI	0.93	0.13	<.001
	60% UI	0.94	0.13	<.001

#### 6.4.2.3.2 Maximale Bremspedalstellung

Die Ergebnisse zur **maximalen Bremspedalstellung** sind in Abbildung 49 dargestellt. Die Zuverlässigkeit der Fahrerunterstützung beeinflusst die Bremsstärke in Abhängigkeit vom jeweiligen Prüfzenario (Interaktion **Szenario\*Zuverlässigkeit**, siehe Tabelle 52). Eine nach Szenarien getrennte Auswertung des Effekts<sup>23</sup> (siehe Tabelle 53) ergibt jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen den Zuverlässigkeitsbedingungen.

Wie im ersten Studienteil bremsen die Fahrer bei rein visuellen Fahrerinformationen ( $M = 46.42\%$ ,  $SE = 3.13$ ) in der Anfahrt an den Konfliktpunkt stärker ab als bei visuell-auditiven

<sup>23</sup> ANOVA mit der unabhängigen Variable „Zuverlässigkeit“ und der AV „maximale Bremspedalstellung“, getrennt nach den Versuchsszenarien.

Fahrerinformationen ( $M = 32.60\%$ ,  $SE = 3.19$ , Effekt **Assistenzbedingung**), was durch die später einsetzende Bremsreaktion (siehe Ergebnisse zur TTA bei Bremsbeginn) erklärt werden kann. Wie aus geplanten Kontrasten der assistierten zur nicht-assistierten Fahrt hervorgeht, bremsen die Probanden trotz Unzuverlässigkeit der Fahrerinformationen in allen visuell-auditiven Bedingungen weniger stark ab als in der nicht-assistierten Fahrt (siehe Tabelle 54). In der Bedingung mit visueller Fahrerunterstützung trifft dies nur für die Bedingung mit unnötigen Informationen zu.

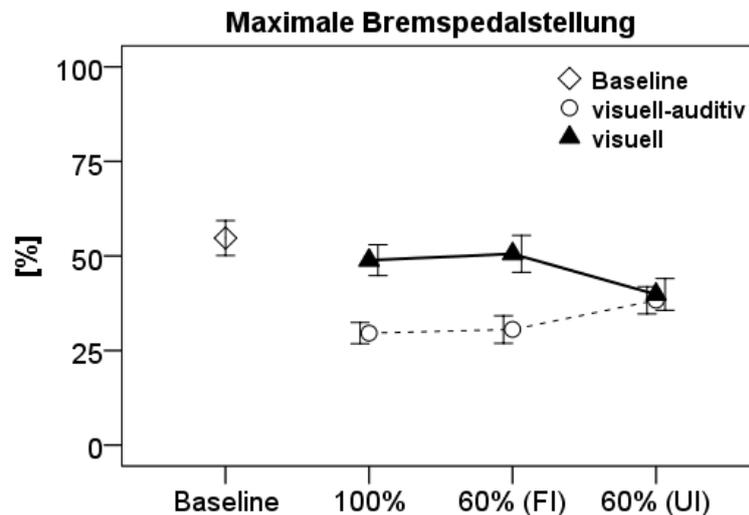


Abbildung 49: Maximale Bremspedalstellung; dargestellt sind Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Tabelle 52: Maximale Bremspedalstellung; ANOVA Ergebnisse.

Effekt	F	df <sub>1</sub>	df <sub>2</sub>	p	$\eta^2$
Assistenzbedingung	9.58	1	53	.003	0.15
Zuverlässigkeit	0.09	2	53	.912	0.00
Zuverlässigkeit * Assistenzbedingung	1.91	2	53	.159	0.07
Szenario	15.15	3	51	<.001	0.47
Szenario * Zuverlässigkeit	2.25	6	104	.044	0.12
Szenario * Assistenzbedingung	0.28	3	51	.841	0.02
Szenario * Zuverlässigkeit * Assistenzbedingung	1.44	6	104	.205	0.08

Tabelle 53: Maximale Bremspedalstellung; ANOVA Ergebnisse zum Einfluss der Zuverlässigkeit in den einzelnen Versuchssituationen (UV: Zuverlässigkeit).

Effekt	F	df <sub>1</sub>	df <sub>2</sub>	p	$\eta^2$
Abbiegender PKW	0.32	2	56	.726	.01
Kreuzender PKW	0.03	2	57	.974	.00
Überschreitender FG	0.60	2	57	.555	.02
Kreuzender RF	0.56	2	57	.577	.02

Tabelle 54: Maximalen Bremspedalstellung; geplante Kontraste zur Baseline.

Assistenzbedingung	Zuverlässigkeit	Maximale Bremspedalstellung		
		Differenz zur Baseline	Standardfehler	p
visuell-auditiv	100%	-26.35	6.33	<.001
	60% FI	-23.59	6.10	<.001
	60% UI	-16.44	6.10	.010
visuell	100%	-5.86	7.54	.441
	60% FI	-4.19	7.54	.581
	60% UI	-14.89	7.54	.054

#### 6.4.2.4 Nachbefragung

Abbildung 50 zeigt die Ergebnisse der Nachbefragung zur Leichtigkeit der Benutzung („*Ease of Use*“) und Gebrauchssicherheit („*Safety of Use*“) der Fahrerinformationen. Wie aus Tabelle 55 und Tabelle 56 hervorgeht, zeigen sich Einschränkungen der Akzeptanz durch falsche, nicht aber durch unnötige Informationen. Die Probanden berichten bei falschen Fahrerinformationen (Effekt **Zuverlässigkeit** und geplante Kontraste zwischen den Zuverlässigkeitsbedingungen), dass

- sie in stärkerem Umfang andere Verkehrsteilnehmer gefährdet hätten,
- die Fahrerinformation unnötig sei,
- die Fahrerinformation störend sei.

Kein Unterschied zwischen den Zuverlässigkeitsbedingungen findet sich bei den Items:

- „Die Information war nervig“
- „Das Lesen der Information war anstrengend“
- „Die Information hat vom Fahren abgelenkt“

Die **Assistenzbedingung** (visuell vs. visuell-auditiv) beeinflusst die Ergebnisse der Nachbefragungitems nicht. Zusammengenommen finden sich trotz der Akzeptanz-Einschränkungen durch falsche Informationen bei der Leichtigkeit der Benutzung („*Ease of Use*“) und Gebrauchssicherheit („*Safety of Use*“) insgesamt positive Einschätzungen.

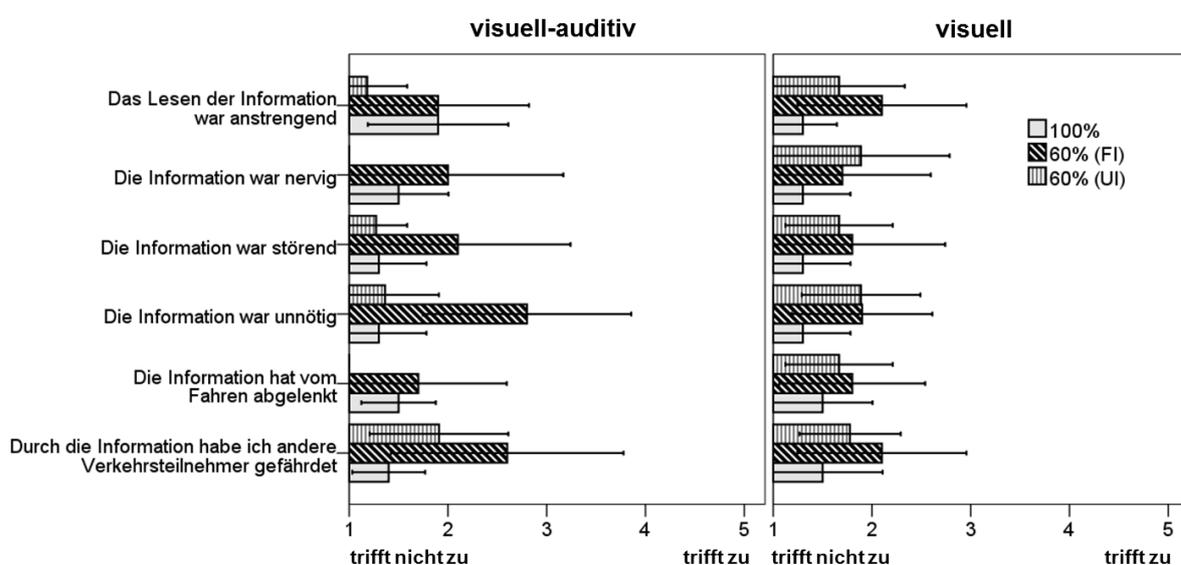


Abbildung 50: Nachbefragungsergebnisse zur Leichtigkeit der Benutzung und Gebrauchssicherheit der Fahrerinformationen; dargestellt sind Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Tabelle 55: ANOVA-Ergebnisse der Nachbefragung zur Gebrauchssicherheit und Leichtigkeit der Benutzung.

Aspekt	Frage	Effekt	F	df <sub>1</sub>	df <sub>2</sub>	p	$\eta^2$
„Ease of Use“	Das Lesen der Information war anstrengend	Assistenzbedingung	0.00	1	54	1.000	0.00
		Zuverlässigkeit	2.07	2	54	.137	0.07
		Interaktion	1.55	2	54	.222	0.05
	Die Information war nervig	Assistenzbedingung	0.14	1	54	.711	0.00
		Zuverlässigkeit	1.25	2	54	.295	0.04
		Interaktion	1.71	2	54	.190	0.06
	Die Information war störend	Assistenzbedingung	0.00	1	54	1.000	0.00
		Zuverlässigkeit	2.35	2	54	.105	0.08
		Interaktion	0.46	2	54	.636	0.02
	Die Information war unnötig	Assistenzbedingung	0.46	1	54	.500	0.01
		Zuverlässigkeit	6.49	2	54	.003	0.19
		Interaktion	2.46	2	54	.095	0.08
"Safety of Use"	Die Information hat vom Fahren abgelenkt	Assistenzbedingung	1.26	1	54	.267	0.02
		Zuverlässigkeit	1.56	2	54	.219	0.06
		Interaktion	0.80	2	54	.457	0.03
	Durch die Information habe ich andere Verkehrsteilnehmer gefährdet	Assistenzbedingung	0.73	1	54	.396	0.01
		Zuverlässigkeit	3.64	2	54	.033	0.12
		Interaktion	0.42	2	54	.661	0.02

Tabelle 56: Geplante Kontraste (inferenzstatistische Prüfung der Differenzen zwischen den Zuverlässigkeits-Bedingungen) der Items der Gebrauchssicherheit und Leichtigkeit der Benutzung im zweiten Studienteil.

Frage	100% vs. 60% FI		100% vs. 60% UI	
	Differenz	p	Differenz	p
Das Lesen der Information war anstrengend	0.40	.189	-0.20	.509
Die Information war nervig	0.45	.178	0.00	1.000
Die Information war störend	0.65	.039	0.15	.628
Die Information war unnötig	1.05	.001	0.30	.332
Die Information hat vom Fahren abgelenkt	0.25	.330	-0.20	.435
Durch die Information habe ich andere Verkehrsteilnehmer gefährdet	0.90	.008	0.40	.230

Wie aus Abbildung 51 bzw. Tabelle 57 und Tabelle 58 hervorgeht, wird die Nützlichkeit des Systems bei falschen, nicht aber bei unnötigen Informationen in den meisten Items geringer eingeschätzt als die Nützlichkeit der Systemauslegung mit korrekten Informationen (Effekt **Zuverlässigkeit** bzw. geplante Kontraste zwischen den Zuverlässigkeits-Bedingungen). Gegenüber der Fahrerunterstützung mit korrekten Fahrerinformationen geben die Probanden bei der Unterstützungsvariante mit falschen Information an, dass

- die Fahrsicherheit weniger gesteigert wurde,
- im Alltag Unfälle durch die Fahrerunterstützung in geringerem Umfang verhindert würden,
- sie Konfliktsituationen in geringerem Umfang schneller erkannt hätten,
- die Information weniger nachvollziehbar war,
- die Information weniger hilfreich war.

Tendenziell geben die Probanden auch für unnötige Informationen an, dass diese im Gegensatz zu korrekten Informationen:

- weniger nachvollziehbar waren
- weniger hilfreich waren.

Ein Einfluss der **Assistenzbedingung** (visuell vs. visuell-auditiv) findet sich auch bei den Nachbefragungsisems nicht.

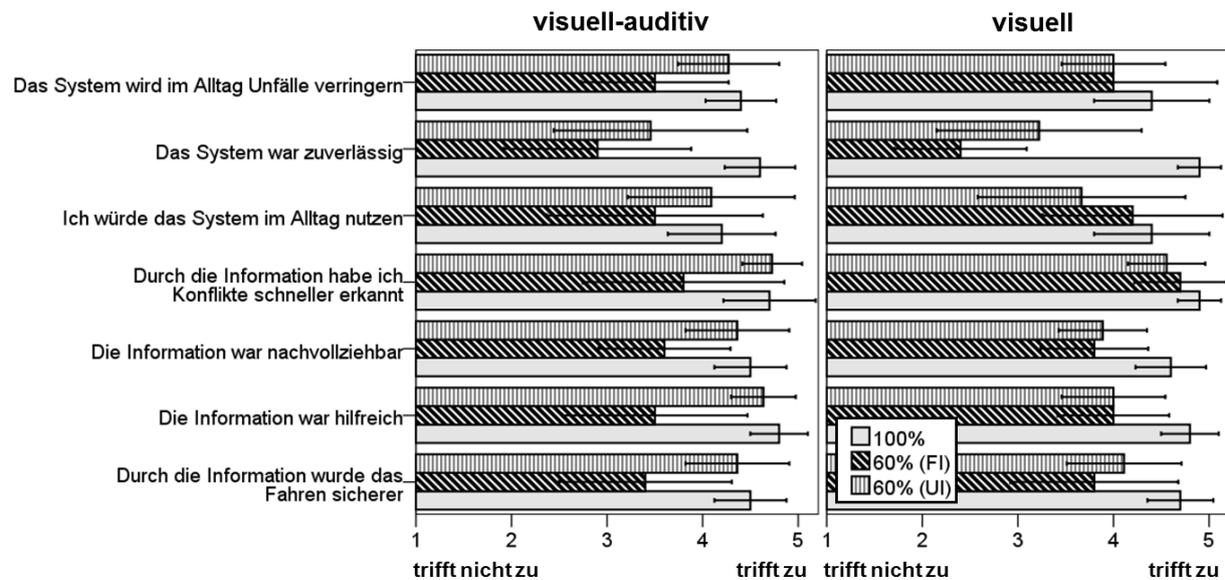


Abbildung 51: Nachbefragungsergebnisse zur Nützlichkeit der Fahrerinformationen. Dargestellt sind Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Weiterhin berichten die Probanden von einer verminderten Systemzuverlässigkeit durch unnötige und falsche Informationen. Trotz der oben genannten Einschränkungen der Probandenurteile in diversen Bewertungsaspekten beeinflusst die Zuverlässigkeit der Fahrerinformationen die Zustimmung im Item „*Ich würde das System im Alltag nutzen*“ nicht.

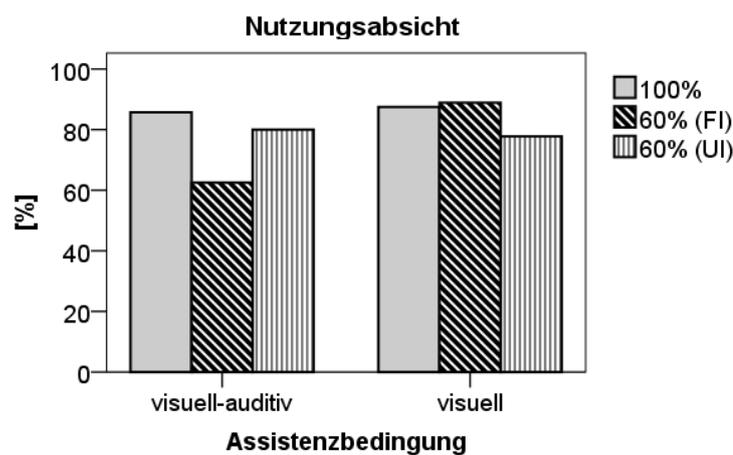
Tabelle 57: ANOVA-Ergebnisse der Nachbefragung; Nützlichkeit der Fahrerinformationen.

Aspekt	Frage	Effekt	F	df <sub>1</sub>	df <sub>2</sub>	p	η <sup>2</sup>
"Usefulness"	Das Informationssystem wird im Alltag Unfälle verringern	Assistenzbedingung	0.30	1	53	.584	0.01
		Zuverlässigkeit	2.41	2	53	.099	0.08
		Interaktion	0.58	2	53	.565	0.02
	Das System war zuverlässig	Assistenzbedingung	0.12	1	54	.730	0.00
		Zuverlässigkeit	18.40	2	54	<.001	0.41
		Interaktion	0.64	2	54	.529	0.02
	Ich würde das System im Alltag nutzen	Assistenzbedingung	0.76	1	54	.388	0.02
		Zuverlässigkeit	0.29	2	54	.749	0.01
		Interaktion	0.49	2	54	.614	0.02
	Durch die Information habe ich Konflikte schneller erkannt	Assistenzbedingung	2.71	1	54	.105	0.05
		Zuverlässigkeit	2.63	2	54	.081	0.09
		Interaktion	2.14	2	54	.127	0.07
	Die Information war nachvollziehbar	Assistenzbedingung	0.13	1	54	.722	0.00
		Zuverlässigkeit	6.93	2	54	.002	0.20
		Interaktion	1.37	2	54	.262	0.05
	Die Information war hilfreich	Assistenzbedingung	0.00	1	54	1.000	0.00
		Zuverlässigkeit	9.08	2	54	<.001	0.25
		Interaktion	2.05	2	54	.139	0.07
	Durch die Information wurde das Fahren sicherer	Assistenzbedingung	0.51	1	54	.479	0.01
		Zuverlässigkeit	6.28	2	54	.004	0.19
		Interaktion	0.39	2	54	.682	0.01

Tabelle 58: Geplante Kontraste (inferenzstatistische Prüfung der Differenzen zwischen den Zuverlässigkeits-Bedingungen) der Items der Nützlichkeit der Fahrerinformationen.

Frage	100% vs. 60% FI		100% vs. 60% UI	
	Differenz	p	Differenz	p
Das Informationssystem wird im Alltag Unfälle verringern	-0.66	.028	-0.25	.392
Das System war zuverlässig	-2.10	<.001	-1.40	<.001
Ich würde das System im Alltag nutzen	-0.10	.483	-0.08	.585
Durch die Information habe ich Konflikte schneller erkannt	-0.55	.036	-0.15	.561
Die Information war nachvollziehbar	-0.85	<.001	-0.40	.085
Die Information war hilfreich	-1.05	<.001	-0.45	.077
Durch die Information wurde das Fahren sicherer	-1.00	.001	-0.35	.220

Abbildung 53 stellt die Nachbefragungsergebnisse zur Nutzungsabsicht dar. Trotz der Unzuverlässigkeit der Fahrerinformationen ist die Nutzungsabsicht insgesamt als hoch zu betrachten. Über die verschiedenen Versuchsbedingungen hinweg geben ca. 80% der Fahrer an, dass sie das System im Alltag nutzen würden.



Assistenzbedingung	nein	ja	keine Angabe	N
visuell-auditiv				
100%	1	6	3	10
60% FI	3	5	2	10
60% UI	2	8	0	10
visuell				
100%	1	7	2	10
60% FI	1	8	1	10
60% UI	2	7	1	10

Abbildung 52: Nachbefragungsergebnisse zur Nutzungsabsicht.

Bei alleiniger Betrachtung visuell-auditiver Fahrerinformationen, fällt der Anteil durch falsche Alarmer auf ca. 60%. Dieser Unterschied in der relativen Häufigkeit der Nutzungsabsicht ist allerdings statistisch nicht signifikant (Logistische Regression mit den Prädiktoren „Assistenzbedingung“, „Zuverlässigkeit“ und der Interaktion „Assistenzbedingung x Zuverlässigkeit“; Modellgüte:  $\chi^2 = 2.31$ ,  $df = 5$ ,  $p = .806$ ).

## 6.5 Studienteil C: Fehlerhafte Richtungsanzeigen

### 6.5.1 Methodik

#### 6.5.1.1 Versuchsdesign

Ziel dieses Versuchsteils (C) war es zu untersuchen, inwieweit richtungsspezifische Fahrerinformationen, wie sie in den vorherigen Studienteilen (A und B) verwendet wurden, im Fehlerfall die Fahrerreaktion und Akzeptanz der Fahrerinformationen einschränken. Der hier untersuchte Fehlerfall bestand darin, dass eine *fehlerhafte* Konfliktrichtung angezeigt wurde (d.h. der jeweilige Konfliktpartner nähert sich aus einer anderen als der angezeigten Richtung). Wie in den vorangegangenen Versuchsteilen wurden die Probanden beim Durchfahren einer längeren Simulatorstrecke in unregelmäßigen Abständen mit kritischen Verkehrsszenarien konfrontiert. Ein Fahrer konnte an diesem Versuchsteil aufgrund von Übelkeit nicht teilnehmen. Bei einem weiteren Fahrer kam es zu technischen Problemen bei der Datenaufzeichnung, weswegen sich die Stichprobe in diesem Versuchsteil auf  $N = 78$  reduzierte<sup>24</sup>.

Die **Assistenzbedingung** aus den Studienteilen A und B (**visuell-auditiv** oder **rein visuelle** Fahrerinformation bzw. **Baseline**-Bedingung ohne Fahrerunterstützung) wurden beibehalten. Innerhalb der Versuchsgruppen mit Fahrerunterstützung wurde die **Richtungsspezifität** der Anzeigen variiert (siehe Tabelle 59). Eine Hälfte der Probanden wurde über die jeweiligen Konfliktsituationen richtungsspezifisch informiert, wobei die Richtungsanzeige *fehlerhaft* war (d.h. der Konfliktpartner näherte sich aus der anderen als der angezeigten Richtung). Die andere Hälfte der Probanden wurde richtungsunspezifisch über die Konfliktsituationen informiert. Die unspezifische Anzeige erfolgte im Gegensatz zur richtungsspezifischen Anzeige immer korrekt.

Tabelle 59: Versuchsplan, Studienteil C.

	Richtungsspezifität	
	unspezifisch	spezifisch (fehlerhaft)
Assistenzbedingung		
Visuell	15	14
Visuell-auditiv	14	15
Baseline	20	

Alle Probanden wurden innerhalb der Versuchsstrecke (ca. 30-40 Minuten Fahrtzeit) mit insgesamt sechs verschiedenen Prüf szenarien (fehlerhafte Anzeige der Konfliktrichtung) und sechs weiteren Distraktor-Szenarien (korrekte Anzeige der Konfliktrichtung in richtungsspezifischer Bedingung<sup>25</sup>) konfrontiert. Die Prüf szenarien bestanden aus sogenannten Einfach- und Mehrfachkonflikten, welche sich voneinander in der spezifischen Verkehrskonstellation unterschieden:

<sup>24</sup> Ein Fahrer beendete aufgrund von Simulator-Übelkeit bereits nach Studienteil B seine Teilnahme am Versuch.

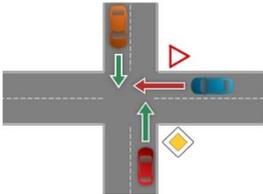
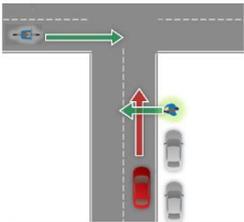
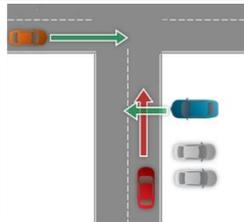
<sup>25</sup> Unspezifische Anzeigen waren stets korrekt, da diese keine Richtungsinformation enthielten.

- **Einfachkonflikt:** Nur ein potentieller Konfliktpartner ist anwesend, der sich bei fehlerhaft-richtungsspezifischer Anzeige aus der anderen als der angezeigten Richtung annähert (siehe Tabelle 60).
- **Mehrfachkonflikt:** Bei Mehrfachkonflikten nähert sich ein zusätzlicher Konfliktpartner aus der angezeigten Richtung an, der jedoch anhält, wodurch kein Kollisionspotential besteht. Der andere Konfliktpartner (= primärer Konfliktpartner) überfährt den Konfliktpunkt mit unverminderter Geschwindigkeit, so dass es zu einer Kollision mit dem Ego-Fahrer kommen würde, falls dieser nicht in die Fahrzeugführung eingreift. Bei fehlerhaft-richtungsspezifischer Anzeige wird in diesem Fall auf den falschen Konfliktpartner hingewiesen (siehe Tabelle 61).

Tabelle 60: Übersicht über die Prüfsituationen, Studienteil C, Einfachkonflikte. Dargestellt ist jeweils die fehlerhaft-richtungsspezifische Anzeige.

Szenarienbeschreibung	Schematische Darstellung	Anzeige	Fahrsicht
Kreuzender PKW: Ein von rechts kommender PKW nimmt dem Probanden die Vorfahrt			
Überschreiten: Ein Fußgänger überquert die Fahrbahn			
Kreuzender Radfahrer: Ein von links kommender Radfahrer nimmt dem Probanden die Vorfahrt			

Tabelle 61: Übersicht über die Prüfsituationen, Studienteil C, Mehrfachkonflikte. Dargestellt ist jeweils die fehlerhaft-richtungsspezifische Anzeige.

Szenarienbeschreibung	Schematische Darstellung	Anzeige	Fahrersicht
Kreuzender PKW: Ein kreuzender PKW von rechts nimmt die Vorfahrt. Gleichzeitig kommt ein Fahrzeug entgegen, das im Begriff ist abzubiegen, ohne dem Fahrer den Vorrang zu nehmen.			
Überschreiten: Ein Fußgänger überquert die Straße von rechts kommend. Gleichzeitig nähert sich ein Radfahrer von links, der jedoch anhält.			
Ausparker: Ein PKW parkt rechts zwischen einer Reihe parkender Fahrzeuge aus. Gleichzeitig nähert sich ein weiterer PKW von links, der jedoch anhält.			

Die beiden Arten von Prüfsituationen stellen zwei mögliche Fälle dar, in denen richtungsspezifische Fahrerinformationen bei fehlerhafter Richtungsanzeige einen negativen Effekt auf das Fahrverhalten gegenüber unspezifischen Fahrerinformationen haben könnten. Es wurde erwartet, dass dieser Effekt bei Mehrfachkonflikten im Vergleich zu Einfachkonflikten stärker ausgeprägt ist. Während die fehlerhafte Richtungsanzeige bei Einfachkonflikten vom Fahrer relativ einfach zu erkennen ist (da in der fehlerhaft angezeigten Konfliktrichtung kein potentieller Konfliktpartner anwesend ist), ist es im Fall von Mehrfachkonflikten möglich, dass die Fahrer ihre Aufmerksamkeit in die falsche Richtung lenken, den fehlerhaft angezeigten Konfliktpartner verfolgen, von dem kein Kollisionsrisiko ausgeht, und infolge dessen den primären Konfliktpartner übersehen. Insgesamt durchfuhren die Probanden somit (within):

- Drei Prüfszenarien mit Einfachkonflikt
- Drei Prüfszenarien mit Mehrfachkonflikt
- Sechs Distraktor-Szenarien

Zwischen den einzelnen Prüfsituationen durchfuhren die Probanden unkritische Szenarien ohne Notwendigkeit eines Fahrereingriffs. Es wurden insgesamt sechs verschiedene Situationsabfolgen erstellt, denen die Probanden per Zufall zugewiesen wurden.

### 6.5.1.2 Häufigkeit der Informationsdarbietung

Insgesamt kam es viermalig vor, dass die Probanden so frühzeitig in der Anfahrt an den Konfliktpunkt abbremsten, dass die Fahrerinformationen nicht ausgelöst wurden:

- Ein Proband löste die Fahrerinformation im Szenario „Kreuzender PKW – Einfachkonflikt“ nicht aus (Assistenzbedingung: richtungsspezifisch-visuell-auditiv).

- Drei Probanden lösten die Fahrerinformation im Szenario „Kreuzender PKW – Mehrfachkonflikt“ nicht aus (Assistenzbedingung: 2x unspezifisch-visuell; 1x spezifisch-visuell-auditiv).

## 6.5.2 Ergebnisse

### 6.5.2.1 Vorgehen bei der Ergebnisdarstellung

Bei der Analyse der Ergebnisse ist die Untersuchung der Auswirkungen von fehlerhaften Richtungsanzeigen auf die Fahrerreaktion und die Kritikalität der Prüfsituationen von zentraler Bedeutung. Dabei wird der Frage nachgegangen, inwiefern sich durch fehlerhafte Richtungsanzeigen Einschränkungen der Wirksamkeit und Akzeptanz in den beiden Assistenzbedingungen (visuell vs. visuell-auditiv) im Vergleich zu unspezifischen Anzeigen ergeben. Aufgrund des Versuchsdesigns (2x2-Design mit Zusatzbedingung „Baseline“) wird bei der Analyse analog zum Studienteil B ein zweistufiges Vorgehen gewählt (Vergleich der assistierten Fahrten untereinander und Vergleiche mit der nicht-assistierten Baselinefahrt).

**Vergleich zwischen assistierten Fahrten:** In einem ersten Analyse-Schritt werden die assistierten Fahrten untereinander verglichen. Es wird eine logistische Regression mit dem Anteil kritischer Begegnungen als abhängige Variable sowie mehrere between-within ANOVAs mit dem Innersubjektfaktor „Szenario“, den Zwischensubjektfaktoren „Spezifität“ und „Assistenzbedingung“ sowie den stetigen Parametern (z.B. TTA bei Bremsbeginn) als jeweilige abhängige Variable durchgeführt.

**Vergleich zur Baseline:** In einem zweiten Analyse-Schritt werden Kontraste zwischen den assistierten Bedingungen und der Baseline-Fahrt berechnet, um die Unterschiede zur nicht-assistierten Fahrt zu analysieren. Dieses Vorgehen erfolgt deswegen, da das Studiendesign bei Einbezug der nicht-assistierten Fahrt nicht orthogonal ist. Die Vergleiche der Assistenz- und Spezifitätsbedingungen mit der nicht-assistierten Fahrt können deswegen nicht gleichzeitig in derselben Analyse betrachtet werden.

Im Folgenden werden die Ergebnisse zu Einfach- und Mehrfachkonflikten getrennt voneinander berichtet.

### 6.5.2.2 Missings bei Einfachkonflikten

In der nicht-assistierten Fahrt überquerte ein Proband den Konfliktpunkt im Szenario „Überschreiten“ bevor der Konfliktpartner diesen erreichte. In zwei Fällen fehlen Daten aufgrund eines Aufzeichnungsfehlers der Simulationssoftware (1x visuell-auditiv, richtungsspezifisch; 1x visuell, unspezifisch; beide im Szenario „Kreuzender Radfahrer“).

Vier Probanden der nicht-assistierten Fahrt bremsen in der Situation „Kreuzender PKW“ nicht ab. Für diese Probanden kann folglich keine TTA bei Bremsbeginn berechnet werden. In den assistierten Fahrten bremsen die Probanden teilweise kurz vor der Informationsdarbietung, so dass keine TTA bei Bremsbeginn berechnet werden kann. Dies trifft auf die folgende Anzahl von Fällen zu:

- Kreuzender PKW – Einfachkonflikt: Drei Probanden in der visuell-auditiven Bedingung mit fehlerhafter Richtungsanzeige;
- Überschreiten – Einfachkonflikt: Drei Probanden in der visuell-auditiven Bedingung mit fehlerhafter Richtungsanzeige und drei Probanden in der visuellen Bedingung mit unspezifischer Anzeige;

### 6.5.2.3 Kritikalität bei Einfachkonflikten

**Vergleich zwischen assistierten Fahrten:** Abbildung 53 stellt den Anteil kritischer Begegnungen getrennt nach Assistenzbedingung und Spezifität der Fahrerinformation dar. Eine Analyse des Anteils **kritischer Begegnungen** innerhalb der assistierten Fahrten zeigt, dass sich hinsichtlich **Spezifität** und **Assistenzbedingung** (visuell vs. visuell-auditiv) kein Unterschied zwischen den Bedingungen ergibt (logistische Regression mit den Prädiktoren Spezifität, Szenario und Assistenzbedingung; Modellgüte:  $\chi^2 = 11.10$ ,  $df = 11$ ,  $p = .435$ , siehe Anteil kritischer Begegnungen in assistierten Fahrten in Abbildung 53).

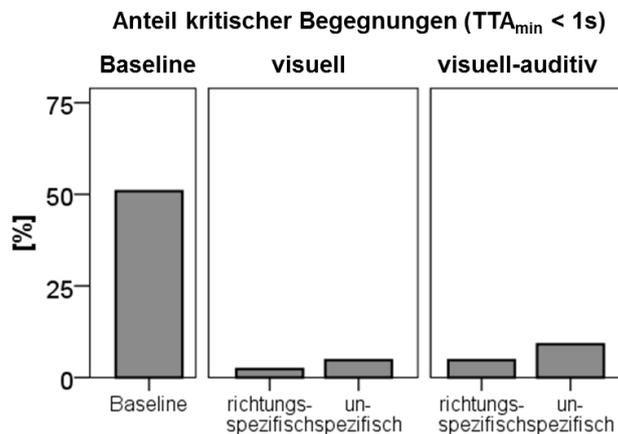


Abbildung 53: Anteil kritischer Begegnungen ( $TTA_{\min} < 1s$ ), Einfachkonflikte.

**Vergleich zur Baseline:** Abbildung 53 (links) stellt außerdem den Anteil kritischer Begegnungen in nicht-assistierten Fahrten dar. Eine getrennte Analyse der Spezifitäts- und Zuverlässigkeitsbedingungen mit der nicht-assistierten Fahrt zeigt, dass sich eine deutliche Minderung im Anteil kritischer Situationen ergibt (siehe Tabelle 62 und Tabelle 63)<sup>26</sup>, wenn die Probanden eine Fahrerunterstützung erhalten, selbst wenn diese in einer fehlerhaften Richtungsanzeige besteht (Prädiktor **Assistenzbedingung** bzw. **Spezifität**). Eine signifikante Interaktion mit dem Szenario findet sich bezüglich der Assistenzbedingung nicht (Interaktion **Assistenzbedingung\*Szenario**, siehe Tabelle 62), während der Einfluss der **Spezifität** tendenziell vom jeweiligen Szenario abhängt (Interaktion **Spezifität\*Szenario**, siehe Tabelle 63).

Um die **Interaktion aus Spezifität und Szenario** weiter zu analysieren, werden pro Szenario  $\chi^2$ -Tests mit der Häufigkeit kritischer Begegnungen als abhängige Variable und der Spezifität (richtungsspezifisch vs. unspezifisch vs. Baseline) als unabhängige Variable durchgeführt. Wie in Abbildung 54 ersichtlich, geht die berichtete marginal signifikante Interaktion aus Spezifität und Szenario darauf zurück, dass der Anteil kritischer Begegnungen in den Szenarien „Kreuzender PKW“ ( $\chi^2 = 56.77$ ,  $df = 2$ ,  $p < .001$ ) und „Kreuzender Radfahrer“ ( $\chi^2 = 14.49$ ,  $df = 2$ ,  $p = .001$ ) durch die Fahrerinformationen (unabhängig von der Spezifität) gesenkt wird, nicht aber im Szenario „Überschreitender Fußgänger“ ( $\chi^2 = 3.22$ ,  $df = 2$ ,  $p = .200$ ). Dies kann dadurch erklärt werden, dass in diesem Szenario im Gegensatz zu den beiden anderen Versuchsszenarien wenige kritische Begegnungen in der nicht-assistierten Fahrt stattfinden, so dass sich auch keine Minderung im Anteil kritischer Situationen einstellen kann.

<sup>26</sup> In diesem Fall wird die Baseline-Fahrt in die Prädiktion aufgenommen und jeweils einer der beiden Prädiktoren weggelassen (Beispiel: Prädiktor Spezifität = Baseline vs. richtungsspezifische Anzeige vs. unspezifische Anzeige), aber die Fahrten bleiben in der Auswertung enthalten. Dieses Vorgehen muss gewählt werden, da das Versuchs-Design nicht orthogonal ist (die Baseline-Bedingung kann nicht gleichzeitig als Stufe von Spezifität und Assistenzbedingung behandelt werden).

Tabelle 62: Logistische Regression; AV: Kritikalität (<1s vs.  $\geq$  1s); UVn: Assistenzbedingung, Szenario, Interaktion; Methode: Einschluss, Referenzkategorien: Baseline (Assistenzbedingung), Kreuzender PKW (Szenario). Modellgüte:  $\chi^2 = 94.42$ ,  $df = 8$ ,  $p < .001$ .

Prädiktor	B	Wald	df	p	OR
Assistenzbedingung	-	11.86	2	.003	-
<i>visuell-auditiv</i>	-2.16	8.16	1	.004	0.12
<i>visuell</i>	-2.12	7.84	1	.005	0.12
Szenario	-	17.38	2	<.001	-
Assistenzbedingung * Szenario	-	6.16	4	.188	-

Tabelle 63: Logistische Regression; AV: Kritikalität (<1s vs.  $\geq$  1s); UVn: Spezifität, Szenario, Interaktion; Methode: Einschluss, Referenzkategorien: Baseline (Spezifität), Kreuzender PKW (Szenario). Modellgüte:  $\chi^2 = 92.55$ ,  $df = 8$ ,  $p < .001$ .

Prädiktor	B	Wald	df	p	OR
Spezifität	-	11.89	2	.003	-
<i>spezifisch</i>	-2.60	9.19	1	.002	0.07
<i>unspezifisch</i>	-1.79	6.53	1	.011	0.17
Szenario	-	17.38	2	<.001	-
Szenario * Spezifität	-	9.03	4	.060	-

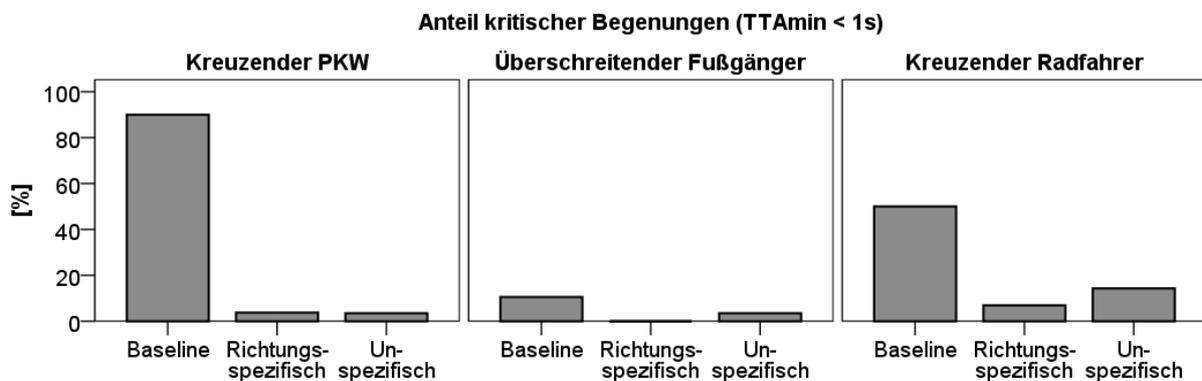


Abbildung 54: Anteil kritischer Begegnungen (TTA<sub>min</sub> < 1s), Einfachkonflikte; getrennte Darstellung nach Spezifität und Szenario.

## 6.5.2.4 Fahrerreaktion bei Einfachkonflikten

### 6.5.2.4.1 Time-to-arrival bei Bremsbeginn

**Vergleich zwischen assistierten Fahrten:** Hinsichtlich des Zeitabstands zum gemeinsamen Konfliktpunkt bei Bremsbeginn finden sich keine Unterschiede hinsichtlich **Spezifität** und **Assistenzbedingung** (visuell vs. visuell-auditiv, siehe Abbildung 55 bzw. Tabelle 64). Im Mittel beginnen die Probanden in den assistierten Fahrten 2.04 Sekunden ( $SE = 0.03$ ) vor Erreichen des Konfliktpunkts mit dem Bremsen.

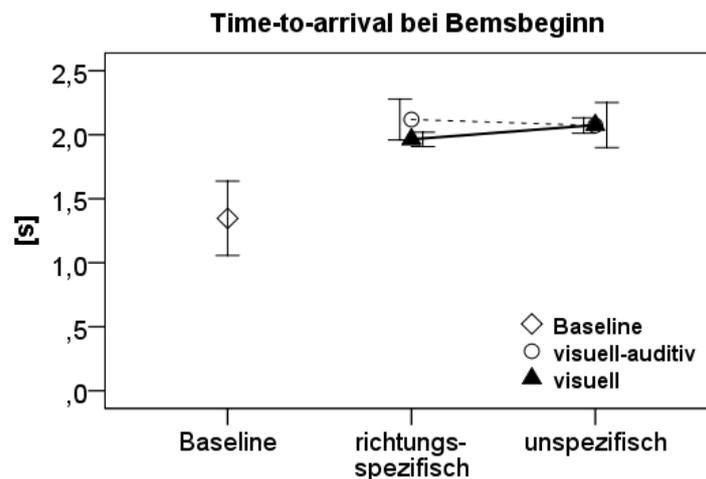


Abbildung 55: Time-to-arrival bei Bremsbeginn; dargestellt sind Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Tabelle 64: Time-to-arrival bei Bremsbeginn; ANOVA-Ergebnisse.

Effekt	F	df <sub>1</sub>	df <sub>2</sub>	p	$\eta^2$
Assistenzbedingung	0.67	1	51	.418	0.01
Spezifität	0.71	1	51	.404	0.01
Assistenzbedingung * Spezifität	0.51	1	51	.478	0.01
Szenario	14.41	2	50	<.001	0.37
Szenario * Assistenzbedingung	1.61	2	50	.211	0.06
Szenario * Spezifität	1.51	2	50	.230	0.06
Szenario * Assistenzbedingung * Spezifität	2.01	2	50	.134	0.08

**Vergleich zur Baseline:** In allen Bedingungen der assistierten Fahrten (d.h. selbst wenn die Konfliktrichtung fehlerhaft angezeigt wurde) beginnen die Probanden signifikant früher mit dem Bremsen als in der nicht-unterstützten Fahrt (siehe Tabelle 65). Der Unterschied liegt im Mittel bei ca. 0.6 s.

Tabelle 65: Time-to-arrival bei Bremsbeginn; geplante Kontraste zur Baseline.

Assistenzbedingung	Richtungsspezifität	Mittlere Differenz zur Baseline	Standardfehler	p
visuell-auditiv	spezifisch	0.67	0.17	<.001
	unspezifisch	0.67	0.17	<.001
visuell	spezifisch	0.57	0.18	.003
	unspezifisch	0.67	0.18	.001

### 6.5.2.4.2 Maximale Bremspedalstellung

**Vergleich zwischen assistierten Fahrten:** Die Fahrer bremsen bei rein visuellen Fahrerinformationen ( $M = 40.22\%$ ,  $SE = 2.86$ , Effekt **Assistenzbedingung**, siehe Abbildung 56 bzw. Tabelle 66) in der Anfahrt an den Konfliktpunkt stärker ab als bei visuell-auditiven Fahrerinformationen ( $M = 28.08\%$ ,  $SE = 2.91$ ). Der Effekt **Spezifität** ist nicht signifikant. Damit führen unspezifische und fehlerhaft richtungsspezifische Anzeigen zu vergleichbaren

maximalen Bremspedalstellungen (siehe Tabelle 66). Auch die maximalen Bremspedalstellungen hängen zusätzlich vom jeweiligen **Versuchsszenario** ab.

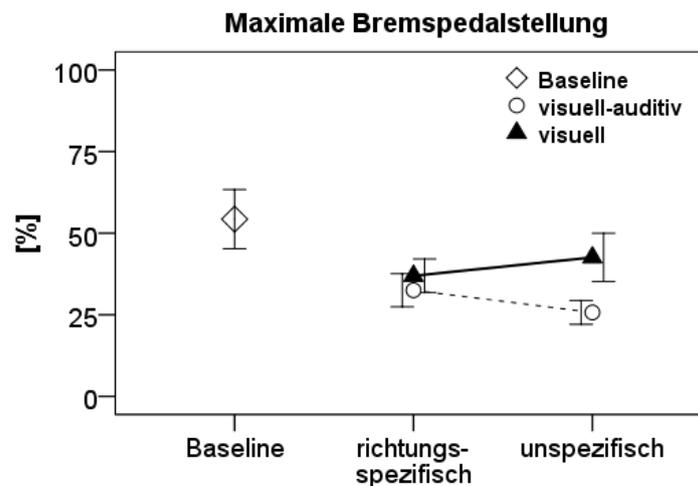


Abbildung 56: Maximale Bremspedalstellung; dargestellt sind Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

**Vergleich zur Baseline:** Gegenüber der nicht-assistierten Fahrt sind die mittleren maximalen Bremspedalstellungen durch die Fahrerunterstützung mit Ausnahme der visuell-unspezifischen Informationen signifikant reduziert (siehe Tabelle 67). Bei visuell-unspezifischen Informationen zeigt sich nur tendenziell eine Verringerung der maximalen Bremsstärke.

Tabelle 66: Maximalen Bremspedalstellung; ANOVA-Ergebnisse.

Effekt	F	df <sub>1</sub>	df <sub>2</sub>	p	$\eta^2$
Assistenzbedingung	8.85	1	51	.004	0.15
Spezifität	0.05	1	51	.818	0.01
Assistenzbedingung * Spezifität	1.92	1	51	.172	0.04
Szenario	7.24	2	50	.002	0.23
Szenario * Assistenzbedingung	1.45	2	50	.244	0.06
Szenario * Spezifität	1.68	2	50	.198	0.06
Szenario * Assistenzbedingung * Spezifität	0.40	2	50	.675	0.02

Tabelle 67: Maximalen Bremspedalstellung; geplante Kontraste zur Baseline.

Assistenzbedingung	Richtungsspezifität	Mittlere Differenz zur Baseline	Standardfehler	p
visuell-auditiv	spezifisch	-24.46	5.65	<.001
	unspezifisch	-29.17	5.53	<.001
visuell	spezifisch	-17.97	6.84	.012
	unspezifisch	-11.38	6.84	.103

## 6.5.2.5 Urteile bei Einfachkonflikten

### 6.5.2.5.1 Kritikalitätseinschätzung

**Vergleich zwischen assistierten Fahrten:** Wie aus Abbildung 57 bzw. Tabelle 68 hervorgeht, findet sich kein Einfluss von **Spezifität** und **Assistenzbedingung** (visuell vs. visuell-auditiv) auf die subjektive Kritikalität bei Fahrten mit Fahrerunterstützung.

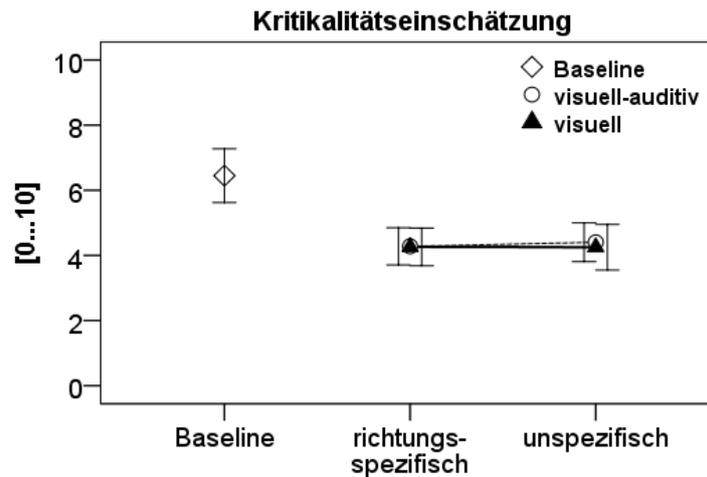


Abbildung 57: Kritikalitätseinschätzung; dargestellt sind Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

**Vergleich zur Baseline:** Die subjektive Kritikalität wird in Fahrten mit Fahrerunterstützung weniger kritisch eingeschätzt als in der nicht-assistierten Fahrt (siehe Abbildung 57 bzw. Tabelle 69). Während Begegnungen ohne Fahrerunterstützung subjektiv im Mittel als „unangenehm“ mit Tendenz zu „gefährlich“ ( $M = 6.45$ ,  $SE = 0.37$ ) bewertet werden, werden Fahrten mit Fahrerunterstützung im Mittel als „harmlos“ mit Tendenz zu „unangenehm“ eingeschätzt (visuell-auditiv:  $M = 4.32$ ,  $SE = 0.30$ ; visuell:  $M = 4.25$ ,  $SE = 0.29$ ).

Tabelle 68: Kritikalitätseinschätzung; ANOVA Ergebnisse.

Effekt	F	df <sub>1</sub>	df <sub>2</sub>	p	η <sup>2</sup>
Assistenzbedingung	0.03	1	51	.872	0.00
Spezifität	0.03	1	51	.859	0.00
Assistenzbedingung * Spezifität	0.06	1	51	.815	0.00
Szenario	8.21	2	50	.001	0.25
Szenario * Assistenzbedingung	0.61	2	50	.546	0.02
Szenario * Spezifität	0.21	2	50	.813	0.01
Szenario * Assistenzbedingung * Spezifität	0.19	2	50	.830	0.01

Tabelle 69: Kritikalitätseinschätzung; geplante Kontraste zur Baseline.

Assistenzbedingung	Richtungsspezifität	Mittlere Differenz zur Baseline	Standardfehler	p
visuell-auditiv	spezifisch	-2.22	0.55	<.001
	unspezifisch	-2.05	0.53	<.001
visuell	spezifisch	-2.19	0.58	<.001
	unspezifisch	-2.21	0.58	<.001

### 6.5.2.5.2 Nützlichkeitschätzung

**Vergleich zwischen assistierten Fahrten:** Wie aus Tabelle 70 hervorgeht, hängen die Nützlichkeitsurteile sowohl von der Spezifität der Anzeigen als auch von der jeweiligen Prüfsituation ab (marginal signifikante Interaktion **Szenario\*Spezifität**). Abbildung 58 zeigt die Nützlichkeitsurteile in Abhängigkeit vom Versuchsszenario. Während unspezifische Informationen im Szenario „Kreuzender PKW“ und „Kreuzender Radfahrer“ nützlicher bewertet werden als fehlerhaft richtungsspezifische Informationen, findet sich im Szenario „Überschreiten“ kein Unterschied im Hinblick auf die Spezifität der Anzeigen (siehe Abbildung 58 bzw. Tabelle 70 für inferenzstatistische Ergebnisse). Visuelle und visuell-auditive Informationen werden von den Fahrern hingegen als vergleichbar nützlich bewertet (Effekt **Assistenzbedingung**).

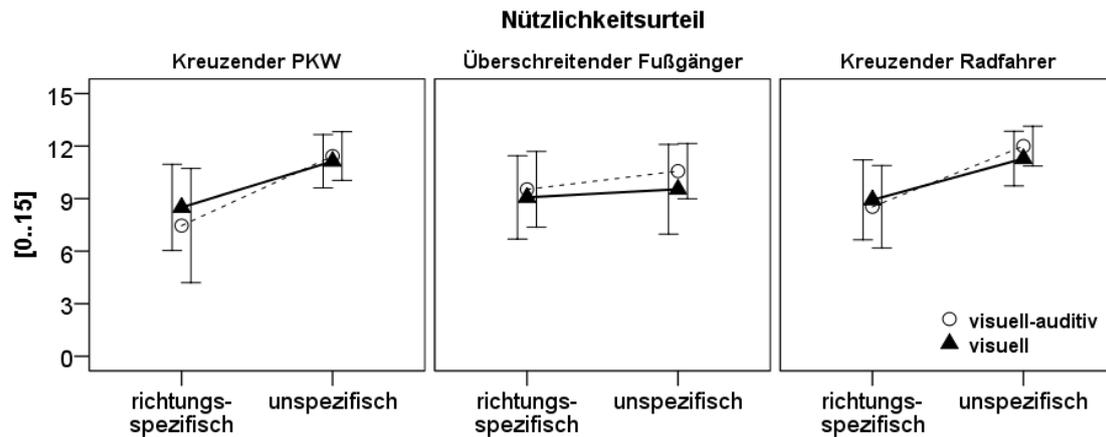


Abbildung 58: Nützlichkeitsurteil; dargestellt sind Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall getrennt nach Versuchsszenario.

Tabelle 70: Nützlichkeitsurteil; ANOVA Ergebnisse.

Effekt	F	df <sub>1</sub>	df <sub>2</sub>	p	η <sup>2</sup>
Assistenzbedingung	0.02	1	51	.896	0.00
Spezifität	7.63	1	51	.008	0.13
Assistenzbedingung * Spezifität	0.25	1	51	.618	0.01
Szenario	1.54	2	50	.225	0.06
Szenario * Assistenzbedingung	0.40	2	50	.672	0.02
Szenario * Spezifität	2.90	2	50	.064	0.10
Szenario * Assistenzbedingung * Spezifität	0.28	2	50	.756	0.01

Tabelle 71: Nützlichkeitsurteil; ANOVA Ergebnisse getrennt nach Versuchsszenario.

Situation	Effekt	F	df <sub>1</sub>	df <sub>2</sub>	p	η <sup>2</sup>
Kreuzender PKW	Assistenzbedingung	0.13	1	52 <sup>27</sup>	.719	0.00
	Spezifität	10.33	1	52	.002	0.17
	Interaktion	0.42	1	52	.519	0.01
Überschreiten	Assistenzbedingung	0.53	1	54	.470	0.01
	Spezifität	0.53	1	54	.470	0.01
	Interaktion	0.08	1	54	.781	0.00
Kreuzender Radfahrer	Assistenzbedingung	0.03	1	53	.859	0.00
	Spezifität	10.64	1	53	.002	0.17
	Interaktion	0.39	1	53	.537	0.01

### 6.5.2.6 Missings bei Mehrfachkonflikten

Zwei Probanden begannen in der visuell-auditiven Assistenzbedingung bei fehlerhaft richtungsspezifischer Anzeige noch vor der Aktivierung der Fahrerinformation mit dem Bremsen, so dass keine Bremsreaktionszeiten berechnet werden konnten (1x Szenario „Kreuzender PKW“, 1x Szenario „Ausparker“).

### 6.5.2.7 Kritikalität bei Mehrfachkonflikten

**Vergleich zwischen assistierten Fahrten:** Eine Betrachtung des Anteils **kritischer Begegnungen** innerhalb der assistierten Fahrten ergibt, dass dieser weder durch die **Spezifität** der Fahrerinformationen, noch die **Assistenzbedingung** (visuell vs. visuell-

<sup>27</sup> Unterschiede in den Freiheitsgraden (df) gehen auf einzelne fehlende Antworten zurück.

auditiv) beeinflusst wird (logistische Regression mit den Prädiktoren Spezifität und Assistenzbedingung, Modellgüte:  $\chi^2 = 13.93$ ,  $df = 11$ ,  $p = .237$ , siehe Abbildung 59).

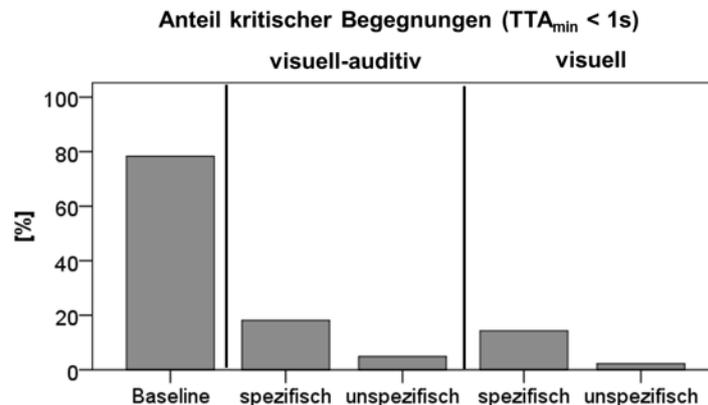


Abbildung 59: Relativer Anteil kritischer Begegnungen ( $TTA_{\min} < 1s$ ), Mehrfachkonflikte.

**Vergleich zur Baseline:** Eine getrennte Betrachtung von Spezifität und Assistenzbedingung unter Einbezug der nicht-assistierten Fahrt zeigt, dass sich eine deutliche Minderung im Anteil kritischer Situationen ergibt (siehe Tabelle 72 und Tabelle 73), wenn die Probanden eine Fahrerunterstützung erhalten, selbst wenn diese in einer fehlerhaften Richtungsanzeige besteht (Prädiktor **Assistenzbedingung** bzw. **Spezifität**). Eine Interaktion mit dem Versuchsszenario besteht nicht.

Tabelle 72: Logistische Regression; AV: Kritikalität (<1s vs.  $\geq 1s$ ); UVn: Assistenzbedingung, Szenario, Interaktion; Methode: Einschluss, Referenzkategorien: Baseline (Assistenzbedingung), Kreuzender PKW (Szenario). Modellgüte:  $\chi^2 = 110.23$ ,  $df = 8$ ,  $p < .001$ .

Prädiktor	B	Wald	df	p	OR
Assistenzbedingung	-	17.46	2	<.001	-
<i>visuell-auditiv</i>	-3.66	10.77	1	.001	0.03
<i>visuell</i>	-2.53	10.97	1	.001	0.08
Szenario	-	5.50	2	.064	-
Assistenzbedingung * Szenario	-	4.75	4	.314	-

Tabelle 73: Logistische Regression; AV: Kritikalität (<1s vs.  $\geq 1s$ ); UVn: Spezifität, Szenario, Interaktion; Methode: Einschluss, Referenzkategorien: Baseline (Spezifität), Kreuzender PKW (Szenario). Modellgüte:  $\chi^2 = 115.47$ ,  $df = 8$ ,  $p < .001$ .

Prädiktor	B	Wald	df	p	OR
Spezifität	-	17.46	2	<.001	-
<i>spezifisch</i>	-2.53	10.97	1	.001	0.08
<i>unspezifisch</i>	-3.64	10.77	1	.001	0.03
Szenario	-	5.50	2	.064	-
Szenario * Spezifität	-	1.91	4	.753	-

## 6.5.2.8 Fahrerreaktion bei Mehrfachkonflikten

### 6.5.2.8.1 Time-to-arrival bei Bremsbeginn

**Vergleich zwischen assistierten Fahrten:** Wie auch in den Szenarien mit Einfachkonflikten finden sich in den Szenarien mit Mehrfachkonflikten keine (negativen) Effekte der **Spezifität** auf die **Time-to-arrival bei Bremsbeginn** (siehe Abbildung 60 bzw. Tabelle 74). Die Probanden beginnen jedoch bei visuell-auditiven Fahrerinformationen bei größerem Abstand zum jeweiligen Konfliktpunkt mit dem Bremsen als bei rein visuellen Fahrerinformationen

(visuell-auditiv:  $M = 1.82$  s,  $SE = 0.03$ ; visuell:  $M = 1.73$  s,  $SE = 0.03$ , Effekt **Assistenzbedingung**).

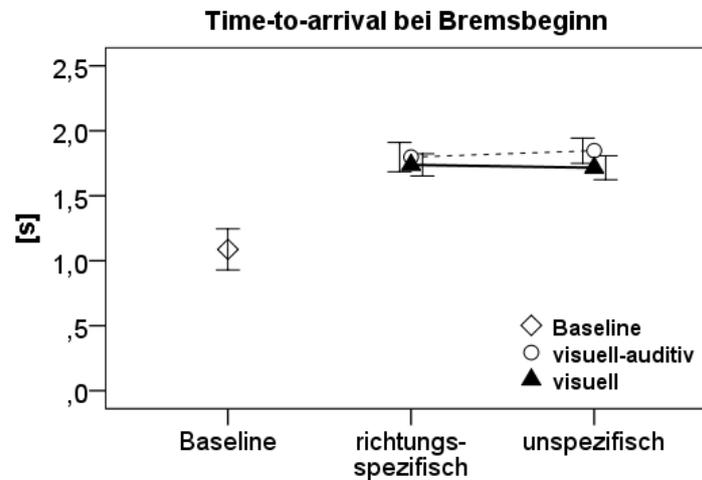


Abbildung 60: Time-to-arrival bei Bremsbeginn; dargestellt sind Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

**Vergleich zur Baseline:** Wie aus Tabelle 75 hervorgeht, bremsen die Probanden in assistierte Fahrten unabhängig von der **Assistenzbedingung** (visuell vs. visuell-auditiv) und **Richtungsspezifität** der Fahrerinformationen in größerem Zeitabstand zum Konfliktpunkt als in der nicht-assistierten Fahrt. Die mittleren Differenzen zur Baseline liegen bei 0.63-0.76 s.

Tabelle 74: Time-to-arrival bei Bremsbeginn; ANOVA Ergebnisse

Effekt	F	df <sub>1</sub>	df <sub>2</sub>	p	$\eta^2$
Assistenzbedingung	4.52	1	51	.038	0.08
Spezifität	0.13	1	51	.719	0.00
Assistenzbedingung * Spezifität	0.59	1	51	.447	0.01
Szenario	69.75	2	50	<.001	0.74
Szenario * Assistenzbedingung	2.73	2	50	.075	0.10
Szenario * Spezifität	0.13	2	50	.879	0.01
Szenario * Assistenzbedingung * Spezifität	0.12	2	50	.884	0.01

Tabelle 75: Time-to-arrival bei Bremsbeginn; geplante Kontraste zur Baseline.

Assistenzbedingung	Richtungsspezifität	Mittlere Differenz zur Baseline	Standardfehler	p
visuell-auditiv	spezifisch	0.71	0.10	<.001
	unspezifisch	0.76	0.10	<.001
visuell	spezifisch	0.65	0.09	<.001
	unspezifisch	0.63	0.09	<.001

**Interaktion mit Versuchssituation:** Die berichtete Vergrößerung des Zeitabstands bei Bremsbeginn durch visuell-auditive Fahrerinformationen hängt tendenziell von der Versuchssituation ab (marginal signifikante Interaktion **Assistenzbedingung\*Szenario**, siehe Tabelle 74): Während die Probanden im Szenario „Kreuzender PKW“ und „Ausparker“ bei visuell-auditiven Fahrerinformationen frühzeitiger mit dem Bremsen beginnen als bei rein visuellen Informationen, findet sich ein solcher Effekt im Szenario „Überschreitender Fußgänger“ nicht (siehe Abbildung 61 und Tabelle 76).

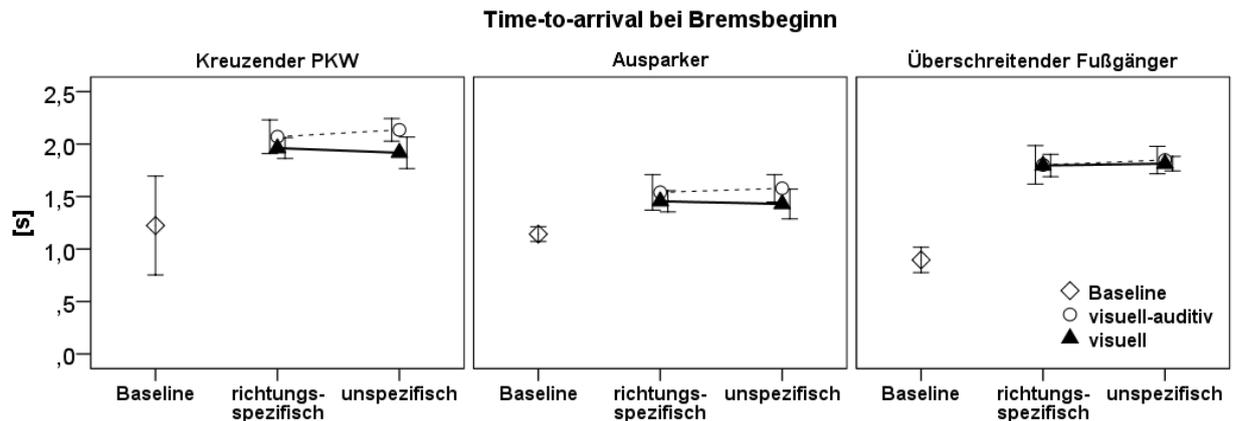


Abbildung 61: Time-to-arrival bei Bremsbeginn getrennt nach Szenario; dargestellt sind Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Tabelle 76: Time-to-arrival bei Bremsbeginn; ANOVA-Ergebnisse getrennt nach Situation.

Situation	Effekt	F	df <sub>1</sub>	df <sub>2</sub>	p	η <sup>2</sup>
Kreuzender PKW	Assistenzbedingung	7.02	1	51	.011	0.12
	Spezifität	0.03	1	51	.869	0.00
	Interaktion	0.79	1	51	.377	0.02
Ausparker	Assistenzbedingung	3.25	1	54	.077	0.06
	Spezifität	0.01	1	54	.920	0.00
	Interaktion	0.24	1	54	.625	0.00
Überschreitender Fußgänger	Assistenzbedingung	0.11	1	54	.739	0.00
	Spezifität	0.28	1	54	.598	0.01
	Interaktion	0.06	1	54	.815	0.00

### 6.5.2.8.2 Maximale Bremspedalstellung

**Vergleich zwischen assistierten Fahrten:** Die Fahrer bremsen in den assistierten Fahrten mit einer mittleren **maximalen Bremspedalstellung** von 40% (mittel stark,  $SE = 2$ ) in der Anfahrt an die jeweilige Konfliktsituation ab. Es findet sich ein marginal signifikanter Haupteffekt **Assistenzbedingung** (visuell vs. visuell-auditiv) und eine marginal signifikante **Interaktion aus Assistenzbedingung und Spezifität** auf die maximalen Bremspedalstellung: Bei visuell-auditiven, nicht aber bei visuellen Fahrerinformationen führen fehlerhafte Richtungsinformationen tendenziell zu einer stärkeren Bremsreaktion (siehe Abbildung 62).

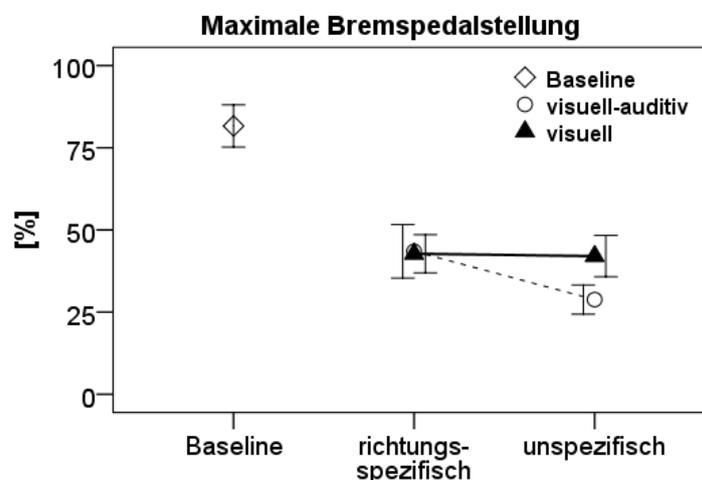


Abbildung 62: Maximale Bremspedalstellung; dargestellt sind Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

**Vergleich zur Baseline:** Der Vergleich mit der nicht-assistierten Fahrt zeigt, dass visuell-auditive und rein visuelle Fahrerinformationen unabhängig von deren Spezifität zu einer Reduktion der Bremsstärken gegenüber der nicht-assistierten Fahrt führen (siehe Tabelle 78). Die mittlere Reduktion der maximalen Bremspedalstellung liegt hierbei zwischen 39% und 52%.

Tabelle 77: Maximale Bremspedalstellung; ANOVA-Ergebnisse.

Effekt	F	df <sub>1</sub>	df <sub>2</sub>	p	$\eta^2$
Assistenzbedingung	1.88	1	51	.177	0.04
Spezifität	3.19	1	51	.080	0.06
Assistenzbedingung * Spezifität	2.82	1	51	.099	0.05
Szenario	7.13	2	50	.002	0.22
Szenario * Assistenzbedingung	2.28	2	50	.113	0.08
Szenario * Spezifität	0.58	2	50	.566	0.02
Szenario * Assistenzbedingung * Spezifität	0.43	2	50	.651	0.02

Tabelle 78: Maximale Bremspedalstellung; geplante Kontraste zur Baseline.

Assistenzbedingung	Richtungs-spezifität	Mittlere Differenz zur Baseline	Standardfehler	p
visuell-auditiv	spezifisch	-37.57	5.42	<.001
	unspezifisch	-52.23	5.54	<.001
visuell	spezifisch	-38.88	5.37	<.001
	unspezifisch	-39.33	5.37	<.001

## 6.5.2.9 Urteile bei Mehrfachkonflikten

### 6.5.2.9.1 Kritikalitätseinschätzung

**Vergleich zwischen assistierten Fahrten:** Während die **Assistenzbedingung** (visuell vs. visuell-auditiv) keinen Einfluss auf die Kritikalitätsurteile der Probanden hat, werden die Situationen mit fehlerhaften richtungsspezifischen Informationen ( $M = 5.08$ ,  $SE = 0.31$ ) tendenziell kritischer beurteilt als mit unspezifischen Informationen ( $M = 4.24$ ,  $SE = 0.31$ ; Effekt **Spezifität**, siehe Abbildung 63 bzw. Tabelle 79).

**Vergleich zur Baseline:** Unabhängig von Spezifität und Assistenzbedingung (visuell vs. visuell-auditiv) führen Fahrerinformationen jedoch zu einer Reduktion der Kritikalitätsurteile gegenüber der nicht-assistierten Fahrt (siehe Tabelle 80).

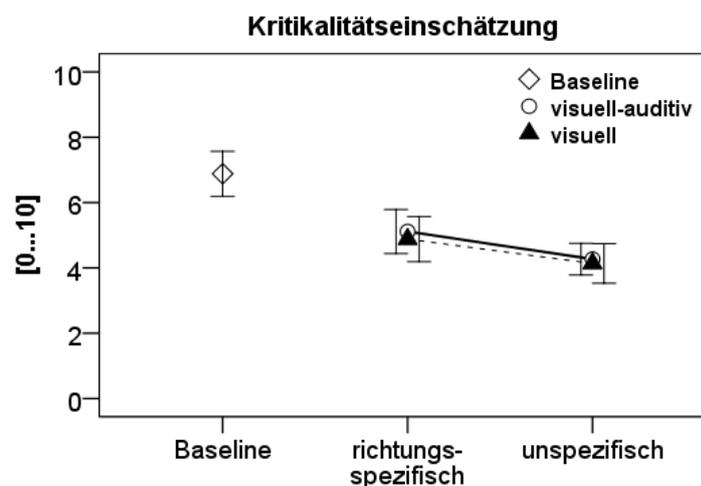


Abbildung 63: Kritikalitätseinschätzung; dargestellt sind Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Tabelle 79: Kritikalitätseinschätzung; ANOVA-Ergebnisse.

Effekt	F	df <sub>1</sub>	df <sub>2</sub>	p	η <sup>2</sup>
Assistenzbedingung	0.32	1	51	.573	0.01
Spezifität	3.76	1	51	.058	0.07
Assistenzbedingung * Spezifität	0.13	1	51	.722	0.00
Szenario	9.99	2	50	<.001	0.29
Szenario * Assistenzbedingung	2.32	2	50	.109	0.85
Szenario * Spezifität	4.29	2	50	.019	0.15
Szenario * Assistenzbedingung * Spezifität	2.51	2	50	.091	0.09

Tabelle 80: Kritikalitätseinschätzung; geplante Kontraste zur Baseline.

Assistenzbedingung	Richtungs-spezifität	Mittlere Differenz zur Baseline	Standardfehler	p
visuell-auditiv	spezifisch	-1.57	0.59	.011
	unspezifisch	-2.58	0.60	<.001
visuell	spezifisch	-1.98	0.65	.004
	unspezifisch	-2.70	0.65	<.001

**Interaktion mit Versuchssituation:** Die berichtete Minderung der Kritikalitätseinschätzungen durch fehlerhaft richtungsspezifische Informationen hängt weiterhin vom Szenario ab (Interaktion **Szenario\*Spezifität**). Abbildung 64 stellt die Kritikalitätsurteile getrennt nach Versuchsszenario dar: Im Szenario „Ausparker“ und im Szenario „Überschreiten“, nicht aber im Szenario „Kreuzender PKW“ berichten die Probanden von einer höheren Kritikalität bei fehlerhaften Richtungsanzeigen gegenüber unspezifischen Informationen (Effekt **Spezifität**, siehe Abbildung 64 und Tabelle 81).

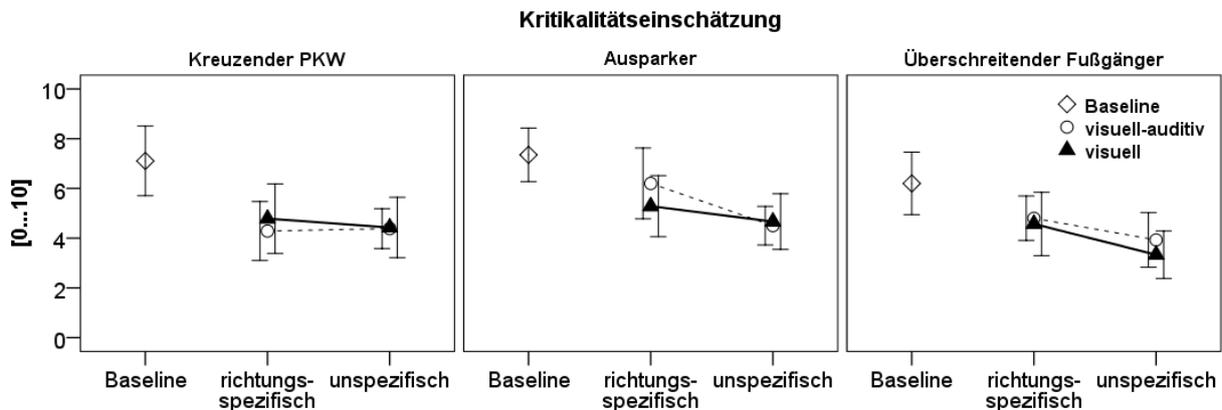


Abbildung 64: Kritikalitätseinschätzung getrennt nach Situation; dargestellt sind Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Tabelle 81: Kritikalitätseinschätzung; ANOVA-Ergebnisse getrennt nach Situation.

Situation	Effekt	F	df <sub>1</sub>	df <sub>2</sub>	p	η <sup>2</sup>
Kreuzender PKW	Assistenzbedingung	0.25	1	51	.621	0.01
	Spezifität	0.06	1	51	.814	0.00
	Interaktion	0.17	1	51	.679	0.00
Ausparker	Assistenzbedingung	0.47	1	54	.496	0.01
	Spezifität	4.53	1	54	.038	0.08
	Interaktion	0.98	1	54	.326	0.02
Überschreitender Fußgänger	Assistenzbedingung	0.71	1	54	.405	0.01
	Spezifität	4.63	1	54	.036	0.08
	Interaktion	0.14	1	54	.710	0.00

### 6.5.2.9.2 Nützlichkeitseinschätzung

**Vergleich zwischen assistierten Fahrten:** Wie aus Tabelle 82 hervorgeht, hängen die **Nützlichkeitsurteile** der Probanden von der Spezifität der Fahrerinformationen ab (Effekt **Spezifität**). Die Nützlichkeit von fehlerhaft richtungsspezifischen Informationen ( $M = 8.82$ ,  $SE = 0.54$ ) wird geringer eingeschätzt als die Nützlichkeit von unspezifischen Informationen ( $M = 11.10$ ,  $SE = 0.55$ ). Ob die Informationen visuell oder visuell-auditiv präsentiert werden, hat hingegen keinen Einfluss auf die Nützlichkeitsurteile (Effekt **Assistenzbedingung**).

Tabelle 82: Nützlichkeitseinschätzung; ANOVA Ergebnisse.

Effekt	F	df <sub>1</sub>	df <sub>2</sub>	p	$\eta^2$
Assistenzbedingung	0.29	1	51	.593	0.01
Spezifität	8.71	1	51	.005	0.15
Assistenzbedingung * Spezifität	1.65	1	51	.205	0.03
Situation	2.21	2	50	.120	0.08
Situation * Assistenzbedingung	1.35	2	50	.268	0.05
Situation * Spezifität	2.49	2	50	.093	0.09
Situation * Assistenzbedingung * Spezifität	0.29	2	50	.748	0.01

**Interaktion mit Versuchssituation:** Die berichtete Differenz der Nützlichkeitsurteile zwischen spezifischen und unspezifischen Informationen hängt tendenziell vom Versuchsszenario ab (Interaktion **Situation\*Spezifität**). Abbildung 65 stellt die Urteile getrennt nach den Situationen dar. Eine szenarienspezifische Analyse der Nützlichkeitsurteile (siehe Tabelle 83) zeigt, dass fehlerhaft richtungsspezifische Informationen im Szenario „Ausparker“ als weniger nützlich als unspezifische Informationen beurteilt werden. In den Szenarien „kreuzender PKW“ und „Überschreiten“ ist dies nur tendenziell der Fall.

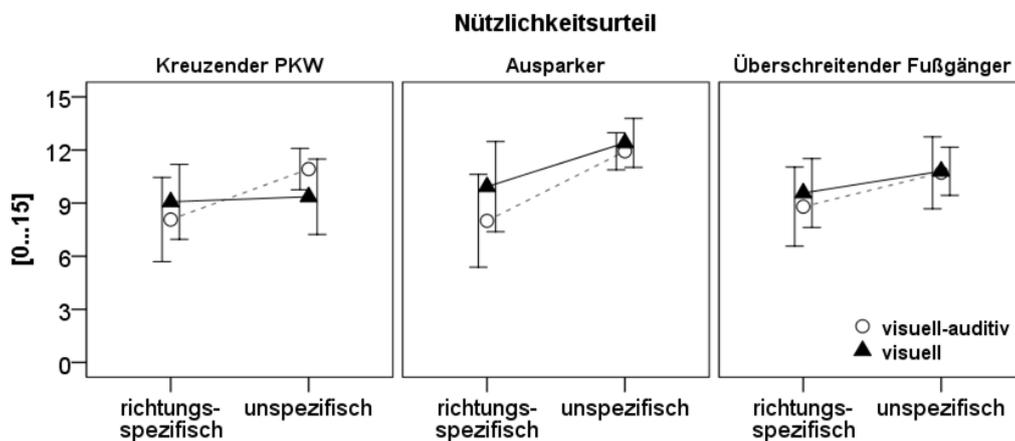


Abbildung 65: Nützlichkeitseinschätzung getrennt nach Szenario; dargestellt sind Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Tabelle 83: Nützlichkeitseinschätzung; ANOVA Ergebnisse getrennt nach Situation.

Situation	Effekt	F	df <sub>1</sub>	df <sub>2</sub>	p	η <sup>2</sup>
Kreuzender PKW	Assistenzbedingung	0.09	1	51	.764	0.00
	Spezifität	2.79	1	51	.101	0.05
	Interaktion	1.87	1	51	.178	0.04
Ausparker	Assistenzbedingung	1.62	1	54	.209	0.03
	Spezifität	11.48	1	54	.001	0.18
	Interaktion	0.60	1	54	.444	0.01
Überschreiten	Assistenzbedingung	0.23	1	54	.633	0.00
	Spezifität	3.11	1	54	.083	0.05
	Interaktion	0.15	1	54	.702	0.00

### 6.5.2.10 Nachbefragung

Im Einklang mit den Ergebnissen zur Nützlichkeit der Fahrerinformationen finden sich auch in der Nachbefragung zur Akzeptanz der Fahrerunterstützung keine Unterschiede hinsichtlich der Dringlichkeit der dargebotenen Informationen (visuell-auditiv vs. rein visuell, Effekt **Assistenzbedingung**, siehe Tabelle 84 bzw. Abbildung 66 und Abbildung 67). Allerdings zeigt sich eine reduzierte Akzeptanz von Fahrerinformationen mit fehlerhaften Richtungsanzeigen bei verschiedenen, wenn auch nicht bei allen Aspekten der Nachbefragung (Effekt **Spezifität**, siehe Tabelle 84 bzw. Abbildung 66 und Abbildung 67). So wird die Unterstützungs-Variante mit fehlerhaften Richtungsanzeigen im Gegensatz zur Variante mit unspezifischen Fahrerinformationen

- weniger nützlich („*Usefulness*“; niedrigere Zustimmung in den Items: „*Durch die Information wurde das Fahren sicherer*“; „*Ich würde das System im Alltag nutzen*“; „*Das System war zuverlässig*“, „*Die Information war nachvollziehbar*“ und „*Die Information war hilfreich*“),
- weniger gebrauchssicher („*Safety of Use*“; tendenziell höhere Zustimmung in der Aussage: „*Die Information hat vom Fahren abgelenkt*“) und
- visuell beanspruchender (höhere Zustimmung in der Aussage: „*Das Lesen der Information war anstrengend*“) eingeschätzt.

In Bezug auf die Leichtigkeit der Benutzung („*Ease of Use*“) findet sich bei den Items „*Die Information war unnötig*“, „*Die Information war störend*“ und „*Die Information war nervig*“ kein Unterschied zwischen fehlerhaft richtungsspezifischen und unspezifischen Anzeigen.

Es ist hervorzuheben, dass die meisten Einschätzungen der Probanden auch in der Unterstützungsvariante mit fehlerhaften Richtungsanzeigen meist am oberen Ende („*Usefulness*“-Items; hohe Zustimmung zu positiv formulierten Items) bzw. unteren Ende („*Safety of Use*“ bzw. „*Ease of Use*“-Items; geringe Zustimmung zu negativ formulierten Items) der jeweiligen Skala liegen. Die angeführten Unterschiede in der Akzeptanz sind zwar statistisch signifikant, jedoch führen die fehlerhaften Richtungsanzeigen nicht zu einem vollkommenen Verlust der fahrerseitigen Akzeptanz.

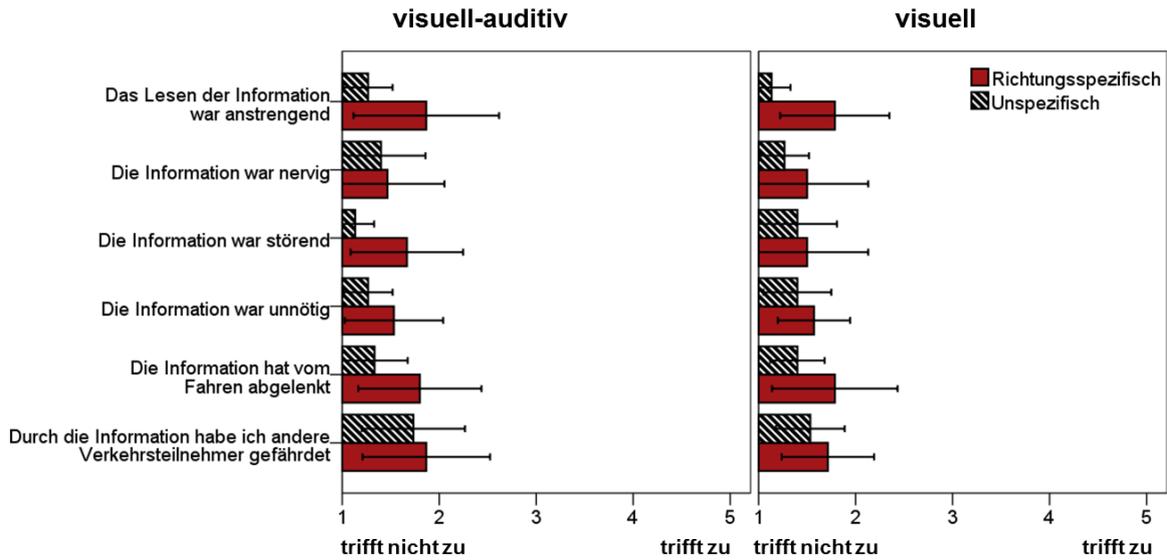


Abbildung 66: Nachbefragungsergebnisse zur Einfachheit der Benutzung („Ease of Use“) und Gebrauchssicherheit („Safety of Use“). Dargestellt sind Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

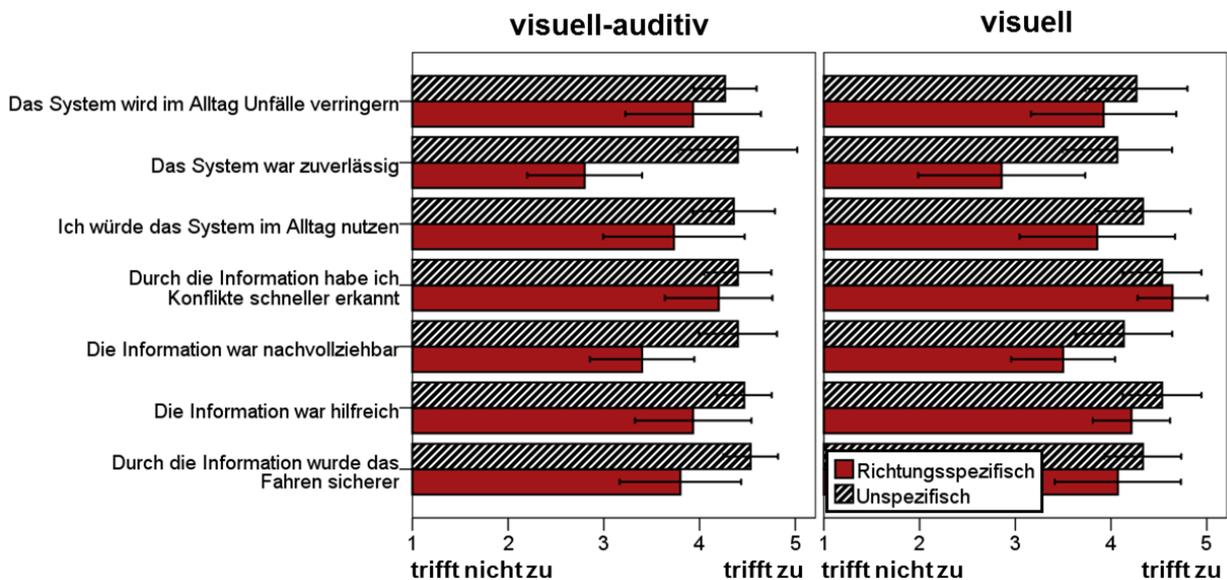
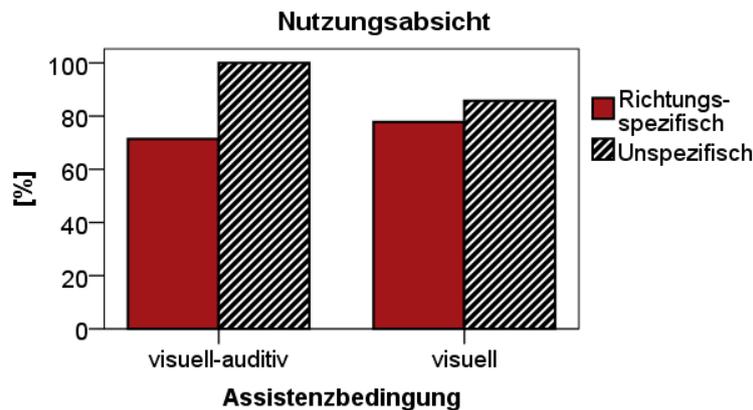


Abbildung 67: Nachbefragungsergebnisse zur Nützlichkeit („Usefulness“). Dargestellt sind Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall

Insgesamt ergibt sich eine hohe Nutzungsabsicht bei den befragten Probanden (siehe Abbildung 68). In den Unterstützungsvarianten mit unspezifischen Fahrerinformationen geben 80% (visuelle Variante) bzw. 100% (visuell-auditive Variante) der Probanden an, dass sie ein solches System nutzen würden. Die Nutzungsabsicht bei fehlerhaften Richtungsanzeigen ist vor allem dann gegenüber der unspezifischen Unterstützungsvariante geringer, wenn die Probanden visuell-auditiv unterstützt werden (Nutzungsabsicht: 100% vs. 73% der Probanden,  $\chi^2 = 3.74$ ,  $df = 1$ ,  $p = .053$ ). Bei rein visueller Unterstützung findet sich ein solcher Einfluss der Spezifität nicht (Nutzungsabsicht: 80% vs. 77% der Probanden,  $\chi^2 = 0.24$ ,  $df = 1$ ,  $p = .624$ ).

Tabelle 84: Inferenzstatistische Ergebnisse zur Nachbefragung.

Aspekt	Item	Effekt	F	df <sub>1</sub>	df <sub>2</sub>	p	$\eta^2$
"Ease of Use"	Das Lesen der Information war anstrengend	Assistenzbedingung	0.25	1	54	.620	0.01
		Spezifität	6.97	1	54	.011	0.11
		Interaktion	0.02	1	54	.879	0.00
	Die Information war nervig	Assistenzbedingung	0.07	1	54	.786	0.00
		Spezifität	0.33	1	54	.568	0.01
		Interaktion	0.17	1	54	.681	0.00
	Die Information war störend	Assistenzbedingung	0.04	1	54	.842	0.00
		Spezifität	1.90	1	54	.174	0.03
		Interaktion	0.88	1	54	.354	0.02
	Die Information war unnötig	Assistenzbedingung	0.18	1	54	.675	0.00
		Spezifität	1.34	1	54	.252	0.02
		Interaktion	0.04	1	54	.834	0.00
"Safety of Use"	Die Information hat vom Fahren abgelenkt	Assistenzbedingung	0.00	1	54	.952	0.00
		Spezifität	3.08	1	54	.085	0.05
		Interaktion	0.15	1	54	.904	0.00
	Durch die Information habe ich andere Verkehrsteilnehmer gefährdet	Assistenzbedingung	0.46	1	54	.500	0.01
		Spezifität	0.46	1	54	.500	0.01
		Interaktion	0.00	1	54	.954	0.00
"Usefulness"	Durch die Information wurde das Fahren sicherer	Assistenzbedingung	0.05	1	54	.830	0.00
		Spezifität	3.92	1	54	.053	0.07
		Interaktion	0.81	1	54	.371	0.02
	Das Informationssystem wird im Alltag Unfälle verringern	Assistenzbedingung	0.00	1	53	.959	0.00
		Spezifität	1.53	1	53	.222	0.28
		Interaktion	0.00	1	53	.988	0.00
	Das System war zuverlässig	Assistenzbedingung	0.14	1	54	.714	0.00
		Spezifität	19.12	1	54	<.001	0.26
		Interaktion	0.30	1	54	.585	0.01
	Ich würde das System im Alltag nutzen	Assistenzbedingung	0.00	1	53	.994	0.00
		Spezifität	4.06	1	53	.049	0.07
		Interaktion	0.18	1	53	.675	0.00
	Durch die Information habe ich Konflikte schneller erkannt	Assistenzbedingung	2.30	1	54	.135	0.04
		Spezifität	0.01	1	54	.908	0.00
		Interaktion	0.43	1	54	.516	0.01
	Die Information war nachvollziehbar	Assistenzbedingung	0.07	1	54	.795	0.00
		Spezifität	11.23	1	54	.001	0.17
		Interaktion	0.47	1	54	.498	0.01
	Die Information war hilfreich	Assistenzbedingung	0.84	1	54	.362	0.02
		Spezifität	3.76	1	54	.058	0.07
		Interaktion	0.18	1	54	.676	0.00



Assistenzbedingung	nein	ja	keine Angabe	N
visuell-auditiv				
unspezifisch	0	11	3	14
spezifisch	4	10	1	15
visuell				
unspezifisch	2	12	3	15
spezifisch	2	7	5	14

Abbildung 68: Nachbefragungsergebnisse zur Nutzungsabsicht.

## 6.6 Diskussion

### 6.6.1 Teil A: Assistenzbedingung

Im ersten Studienteil wurde das in empirischen Vorarbeiten (Studie I: Zeitpunkt der Informationsdarbietung und Studie II: Spezifität der Informationsdarbietung) erarbeitete Unterstützungskonzept anhand einer größeren Probandenstichprobe untersucht. Hierfür wurden die Probanden mit kritischen Verkehrskonflikten konfrontiert und entweder visuell-auditiv, visuell oder nicht unterstützt (between-design). Einerseits sollte dabei überprüft werden, ob sich durch die Fahrerunterstützung ein objektiver und subjektiver Nutzen im Fahrverhalten (z.B. Bremsbeginn in größerem Abstand zum Konfliktpunkt, Verringerung des Anteils kritischer Situationen, etc.) gegenüber einer Baseline-Fahrt einstellt. Zusätzlich sollte untersucht werden, ob sich eine rein visuelle Fahrerunterstützung in ihrer Wirksamkeit von einer visuell-auditiven Fahrerunterstützung, wie sie in Studie I und II verwendet wurde, unterscheidet. Im Sinne eines *accessory stimulus* (Fernandez-Duque & Posner, 1997; Kiesel & Miller, 2007) wurde erwartet, dass die Darbietung eines zusätzlichen auditiven Stimulus die Reaktionszeiten auf die Präsentation der Fahrerinformationen verringern würde (Kramer et al., 2007; Politis et al., 2013). In Anbetracht der Frühzeitigkeit der Fahrerunterstützung sollte jedoch insbesondere untersucht werden, ob eine längere Reaktionszeit bei rein visuellen gegenüber visuell-auditiven Informationen die Wirksamkeit der Fahrerunterstützung entscheidend einschränken würde, oder ob auch rein visuelle Fahrerinformationen eine vergleichbare Verringerung der Situationskritikalität gegenüber der Baseline-Fahrt mit sich bringen würden (siehe bspw. Scott & Gray, 2008).

Sowohl visuell-auditive als auch und rein visuelle Fahrerinformationen senkten die objektive Situationskritikalität gegenüber der Baseline-Fahrt deutlich. In allen untersuchten Szenarien konnte der Anteil kritischer Begegnungen durch beide Varianten der Fahrerunterstützung signifikant verringert werden. Die Versuchsergebnisse entsprechen somit den Ergebnissen von Scott und Gray (2008), in deren Studie sich ebenfalls eine Wirksamkeit rein visueller Warnungen zeigte, wenn diese frühzeitig präsentiert wurden. Ungefähr 90% der Fahrer gaben an, dass sie die Fahrerunterstützung (visuell und visuell-auditiv) im Alltag nutzen würden. Auch in der Fahrt- und Nachbefragung ergaben sich für beide Systemauslegungen

hohe Akzeptanz-Werte bei gleichzeitig niedrigen Einschätzungen der Zusatzbeanspruchung und des Potentials zur Gefährdung anderer Verkehrsteilnehmer. Auf subjektiver Ebene (subjektive Kritikalitätsurteile, Nachbefragungsergebnisse zur Nützlichkeit, Leichtigkeit der Benutzung und Gebrauchssicherheit) unterschieden sich visuelle und visuell-auditive Fahrerinformationen nicht bedeutsam voneinander.

Erwartungsgemäß fand sich bei visuell-auditiven gegenüber rein visuellen Informationen ein früherer Bremsbeginn in nahezu allen Situationen. Die Probanden begannen durch die auditive Komponente im Mittel etwa 300 ms früher zu bremsen. Die Ergebnisse sprechen somit dafür, dass der zusätzliche ungerichtete Ton als *accessory stimulus* wirkt und die Reaktionszeiten auf Fahrerinformationen verkürzt. Als Grund hierfür kann eine erleichterte Reaktionsselektion angesehen werden (Kiesel & Miller, 2007). Demgegenüber bremsen die Fahrer bei rein visueller gegenüber visuell-auditiver Fahrerinformation in nahezu allen Situationen stärker ab, was wahrscheinlich auf den späteren Bremsbeginn zurückzuführen ist.

Zusammengenommen sprechen die Ergebnisse für ein großes Potential frühzeitiger Fahrerinformationen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit. Schon bei erstmaliger Auslösung der Fahrerinformationen steigerten diese die Fahrsicherheit gegenüber der nicht-assistierten Fahrt, ohne dass eine vorherige Instruktion oder Lernphase nötig gewesen wäre. Zur Steigerung ihrer Verhaltenswirksamkeit kann eine auditive Komponente unter der Voraussetzung eines korrekt funktionierenden Systems empfohlen werden (siehe Studienteil B). Im Hinblick auf die Wirksamkeit und Akzeptanz der frühzeitigen Fahrerinformationen scheint eine auditive Komponente jedoch nicht zwingend erforderlich, da auch rein visuelle Fahrerinformationen den Anteil an kritischen Begegnungen verglichen mit der nicht-assistierten Fahrt deutlich senkten.

## 6.6.2 Teil B: Falsche und unnötige Informationen

Im zweiten Studienteil der Untersuchung wurden die Auswirkungen von Falschinformationen auf die Fahrerreaktion, Wirksamkeit und Akzeptanz der Fahrerunterstützung untersucht. Im Mittelpunkt stand hierbei der Vergleich zwischen der nicht-assistierten Baseline-Fahrt, einer Fahrerunterstützung mit stets korrekten Fahrerinformationen und einer Fahrerunterstützung mit falschen (Information, obwohl kein potentieller Konfliktpartner anwesend ist, Zuverlässigkeit: 60%) oder unnötigen Fahrerinformationen (potentieller Konfliktpartner ist anwesend, hält jedoch in der Anfahrt an den Konfliktpunkt an, Zuverlässigkeit: 60%). Die Assistenzbedingungen aus Studienteil A (visuell-auditive Information vs. rein visuelle Information vs. keine Unterstützung) wurden im zweiten Studienteil beibehalten. Zuverlässigkeit und Assistenzbedingung wurde zwischen den Probanden variiert (between-design).

Bei **visuell-auditiver Fahrerunterstützung** zeigten sich die in bisherigen Forschungsarbeiten berichteten (Bliss & Acton, 2003; Cotté et al., 2001; Lees & Lee, 2007; Yamada & Kuchar, 2006) und dementsprechend erwarteten Verhaltenseffekte falscher Informationen. Verglichen mit korrekten Fahrerinformationen führten falsche, nicht aber unnötige Informationen, zu einer Steigerung des Anteils an kritischen Situationen in assistierten Fahrten. Dies lässt sich teilweise dadurch erklären, dass die Probanden infolge der falschen Informationen, verglichen mit den übrigen Zuverlässigkeitsbedingungen, bei kleinerem Abstand zum Konfliktpunkt mit dem Bremsen begannen. Die Versuchsergebnisse replizieren damit frühere Befunde, dass falsche Alarmer mit einem sogenannten *cry wolf effect* (Breznitz, 1983) einhergehen, welcher zu einer *compliance*-Minderung (Meyer, 2004) führt (d.h. Ausbleiben oder Verlangsamung der Fahrerreaktion auf korrekte Alarmer infolge von gehäuften falschen Alarmen).

Bei **rein visueller Fahrerunterstützung** hatte die Zuverlässigkeit der Fahrerinformationen keinen Einfluss auf Fahrerreaktion und Wirksamkeit. Möglicherweise kann dies dadurch erklärt werden, dass falsche Informationen aus Fahrersicht aufgrund einer geringeren

Dringlichkeit (Politis et al., 2013) „verzeihlicher“ sind (J. Hoffmann & Gayko, 2012). Das Ergebnis steht im Einklang mit Studienergebnissen zu gestuften Warnungen, die zeigen konnten, dass eine Anpassung der Dringlichkeit von Warnungen an das Kollisionsrisiko ein Ausbleiben des *cry wolf effects* bedingen kann (d.h. niedrigere Dringlichkeit der Warnung bei niedrigerem Kollisionsrisiko, siehe Gupta et al., 2002; Lee et al., 2004). Die in dieser Studie gefundene Abhängigkeit der Effekte falscher Alarme von den situativen Randbedingungen (falsche vs. unnötige Information) und der Dringlichkeit (visuelle vs. visuell-auditive Information) wurde bislang nicht empirisch gezeigt.

Insgesamt reagierten die Probanden bei visuellen gegenüber visuell-auditiven Fahrerinformationen stets mit einer späteren, aber intensiveren Bremsreaktion. Unabhängig von der Dringlichkeit (visuell-auditiv oder visuell) und Zuverlässigkeit der Fahrerinformationen fand sich jedoch in allen Bedingungen der Fahrerunterstützung **eine deutliche Entschärfung der Situationskritikalität** verglichen mit der nicht-assistierten Fahrt. Trotz des späteren Einsetzens der Fahrerreaktion infolge falscher Informationen in der visuell-auditiven Assistenzbedingung wurden die Fahrer effektiv bei der Kollisionsvermeidung unterstützt.

Die **Akzeptanz** der Fahrerinformationen ist insgesamt als hoch anzusehen. Über alle Versuchsbedingungen hinweg gaben ca. 80% der Fahrer an, dass sie die Fahrerunterstützung im Alltag nutzen würden. Falsche Informationen führten jedoch zu signifikanten Einbußen bei verschiedenen Aspekten der Akzeptanz. Die **Nachbefragungsergebnisse** stützen die Annahme, dass unnötige und falsche Informationen zu unterschiedlichen subjektiven Beurteilungen der Unzuverlässigkeit führen, obwohl aus technischer Sicht in beiden Fällen ein falscher Alarm vorliegt. Während die Probanden der Gruppe mit unnötigen und falschen Informationen von einer geringeren Zuverlässigkeit der Fahrerunterstützung berichten als die Probanden der stets korrekt informierenden Variante, gaben sie nur im Fall von falschen Informationen an, die Fahrerunterstützung als unnötiger oder störender zu empfinden. Außerdem führten falsche Informationen zu einer hoch signifikanten Abnahme der eingeschätzten Nützlichkeit und Verständlichkeit der Fahrerinformationen gegenüber der stets korrekten Fahrerunterstützung. Dies war im Fall von unnötigen Informationen nur tendenziell der Fall.

Die Ergebnisse können so interpretiert werden, dass unnötige Informationen zwar aus technischer Sicht ebenfalls Falschalarme darstellen (wie auch falsche Informationen), bei ihnen jedoch die Gründe für die unnötige Informationsdarbietung nachvollzogen werden können (sog. *process*-Komponente des Vertrauens, Lee et al., 2004; Lees & Lee, 2007). Dies zeigt sich beispielsweise darin, dass Probanden die Fahrerunterstützung mit unnötigen Informationen nicht als störender oder unnötiger beurteilten als die Fahrerunterstützung mit stets korrekten Informationen von den Probanden in dieser Bedingung eingeschätzt wurde. Weiterhin zeigte sich keine signifikante Minderung der Verständlichkeit der Fahrerunterstützung durch unnötige Informationen. Dies könnte dazu geführt haben, dass unnötige Informationen aus Fahrersicht nicht als Falschalarme interpretiert wurden, was möglicherweise einen *cry wolf effect* bei unnötigen Informationen in der visuell-auditiven Bedingung verhindert hat (Lees & Lee, 2007).

### 6.6.3 Teil C: Fehlerhafte Richtungsanzeigen

Der letzte Studienteil schließt die Arbeit mit einer Untersuchung zu den Effekten fehlerhafter Richtungsanzeigen ab. In diesem Studienteil stand die Frage im Mittelpunkt, inwiefern fehlerhafte Richtungsanzeigen einen negativen Einfluss auf Fahrverhalten, Wirksamkeit und Akzeptanz der Mensch-Maschine-Schnittstelle haben würden. Ausgehend vom *spatial cueing* Paradigma (Kingstone, 1992; Klein & Hansen, 1990; Posner et al., 1978) könnte die Lenkung der Fahreraufmerksamkeit an einen anderen Ort, als den tatsächlichen Erscheinungsort eines relevanten Konfliktpartners, mit Reaktionszeiteinbußen einhergehen. Fehlerhafte Richtungsanzeigen könnten folglich die Wirksamkeit der Fahrerunterstützung abschwächen oder schlimmstenfalls von der eigentlichen Gefahrenquelle ablenken, was

sogar zu eine Minderung der Fahrsicherheit verglichen mit der nicht-assistierten Fahrt führen könnte.

Die Probanden wurden in einer Fahrsimulatorstudie mit kritischen Verkehrssituationen konfrontiert. Hierbei wurde einer Hälfte der Probanden in 50% der Fälle die Richtung des drohenden Konflikts fehlerhaft angezeigt (fehlerhaft richtungsspezifische Anzeige), der anderen Hälfte der Probanden wurde nur angezeigt, dass eine drohende Konfliktsituation vorliegt (unspezifische Anzeige). Weiterhin wurde die Dringlichkeit der Fahrerinformationen variiert: Die Probanden wurden entweder rein visuell oder visuell-auditiv informiert. Zusätzlich zu den genannten assistierten Fahrten absolvierte eine Teilstichprobe der Fahrer die Versuchssituationen ohne Unterstützung (Baseline-Fahrt). Die Prüfsituationen variierten darin, ob nur ein potentieller Konfliktpartner zu beachten war (sog. Einfachkonflikt) oder ob ein zusätzlicher potentieller Konfliktpartner anwesend war (sog. Mehrfachkonflikt). Im Fall von Mehrfachkonflikten wurden die Fahrer in der Bedingung fehlerhaft richtungsspezifischer Anzeigen auf den falschen Konfliktpartner hingewiesen. Dieser näherte sich aus der fehlerhaft angezeigten Richtung an den Konfliktpunkt, hielt jedoch an.

Die Ergebnisse sprechen dafür, dass fehlerhafte Richtungsanzeigen zwar keinen bedeutsamen negativen Einfluss auf die Fahrerreaktion und Situationskritikalität haben, jedoch Akzeptanz und Nutzungsabsicht negativ beeinflussen können.

In keinem der untersuchten Einfach- oder Mehrfachkonflikte fand sich ein Einfluss der falschen Richtungsanzeigen auf die **Fahrerreaktion**. Die Probanden reagierten vergleichbar schnell auf fehlerhafte Richtungsanzeigen wie auf unspezifische Informationen und bremsten vergleichbar stark in der Anfahrt an die jeweiligen Konfliktpunkte ab. Unabhängig von der Dringlichkeit (visuell-auditiv vs. visuell) und Spezifität der Fahrerinformationen begannen die Probanden verglichen mit der nicht-assistierten Fahrt signifikant früher zu bremsen und bremsten signifikant schwächer.

Trotz fehlerhafter Richtungsanzeigen reduzierten sich objektive (Anteil kritischer Begegnungen) und subjektive **Situationskritikalität** sowohl bei Einfach- als auch bei Mehrfachkonflikten signifikant. Innerhalb der assistierten Fahrten ergaben sich weder Unterschiede zwischen visuellen und visuell-auditiven, noch zwischen fehlerhaft richtungsspezifischen und unspezifischen Anzeigen.

Obwohl sich keine Wirksamkeitsminderung infolge falscher Richtungsanzeigen fand, kam es zu sichtbaren Einschränkungen bei der **Akzeptanz** der Fahrerunterstützung. Erwartungsgemäß wurden fehlerhafte Richtungsanzeigen in den meisten Fällen als weniger hilfreich eingeschätzt als unspezifische Anzeigen. Aspekte der Akzeptanz wie Nützlichkeit („*Usefulness*“), Gebrauchssicherheit („*Safety of Use*“) und Leichtigkeit der Benutzung („*Ease of Use*“) wurden bei fehlerhaften Richtungsanzeigen geringer eingeschätzt als bei unspezifischen Fahrerinformationen. Besonders im Fall visuell-auditiver Fahrerinformationen ging die Nutzungsabsicht der Probanden infolge fehlerhafter Richtungsanzeigen zurück.

Die Ergebnisse des Versuchs machen deutlich, dass fehlerhafte Richtungsanzeigen nicht zu objektiven Wirksamkeitseinschränkungen der Fahrerunterstützung führen müssen. Die Probanden reagierten vergleichbar schnell und bremsten vergleichbar stark wie bei unspezifischen Fahrerinformationen. Ein objektiv messbarer Ablenkungseffekt durch fehlerhafte Richtungsanzeigen konnte nicht nachgewiesen werden. Damit stehen die Ergebnisse im Einklang mit früheren Studien zu Auswirkungen von fehlerhaften Warnungen (Herzberg, 2012; Totzke et al., 2013). Die Ergebnisse von Herzberg (2012) werden repliziert und auf eine größere Bandbreite an Verkehrssituationen erweitert. Auf Basis der Untersuchungsergebnisse zur Akzeptanz muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass häufige fehlerhafte Richtungsanzeigen zu einer Abnahme der subjektiven Nützlichkeit und Nutzungsabsicht der Fahrerunterstützung führen. Falls mit häufigen fehlerhaften Richtungsanzeigen zu rechnen ist, sollte von der Nutzung gerichteter Fahrerinformationen abgesehen werden.

### 6.6.4 Einschränkungen der Studie

Bei der Interpretation der Ergebnisse muss das vorliegende Versuchsdesign in mehreren Punkten berücksichtigt werden. Innerhalb der ersten beiden Versuchsteile (Versuchsteil A und B) wurde die Konfliktrichtung bei richtungsspezifischen Informationen stets korrekt angezeigt, bevor die Probanden in Studienteil C erstmalig falsche Richtungsinformationen erlebten. Die Versuchsergebnisse zur Auswirkung fehlerhafter Richtungsanzeigen gelten demnach für den Fall, dass Fahrer schon mit dem Informationssystem vertraut sind. Auf Basis der vorliegenden Studie kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass falsche Richtungsanzeigen beim Erstkontakt (d.h. Fahrer haben noch keine Erfahrung im Umgang mit dem Informationssystem) einen negativen Einfluss auf die Fahrerreaktionen haben würden. Andererseits ist gerade der untersuchte Fall, bei dem Fahrer durch vorangegangene, erfolgreiche Lernerfahrungen mit der Fahrerunterstützung womöglich zu sehr auf deren Richtungsanzeigen vertrauen, und infolge dessen ihre Aufmerksamkeit weniger auf das Verkehrsumfeld ausrichten (siehe bspw. Naujoks & Totzke, 2014), als kritischer Fehlerfall zu betrachten.

Weiterhin hängen die Auswirkungen falscher Richtungsanzeigen möglicherweise von der konkreten Gestaltung der Fahrerunterstützung ab. Im vorliegenden Fall wurden die Fahrer visuell oder visuell-auditiv mit einer Anzeige im Head-Up Display informiert. Diese bestand aus einer schematischen Anzeige der jeweiligen Streckengeometrie (z.B. Kreuzung oder Längsverkehr) und der Konfliktrichtung. Es sind jedoch auch andere Konzepte zur Darstellung von Richtungsinformationen möglich, wie beispielsweise LED-Anzeigen mit mehreren Segmenten oder gerichtete auditive Signale. Ob andere als die untersuchten Richtungsanzeigen, welche explizit als unaufdringliche Informationen gestaltet wurden, ebenfalls keinen negativen Einfluss im Fall von fehlerhaften Richtungsanzeigen haben, kann mit der vorliegenden Studien nicht beantwortet werden.

In Bezug auf die Ergebnisse von Studie III ist weiterhin davon auszugehen, dass Verkehrskonflikte im alltäglichen Straßenverkehr eher seltene Ereignisse darstellen. In der vorliegenden Studie traten sie jedoch relativ häufig auf. Folglich kann ein Übungseffekt, oder eine generell höhere Reaktionsbereitschaft als beim alltäglichen Fahren, die Generalisierbarkeit der Versuchsergebnisse einschränken. Gegen einen solchen Übungseffekt spricht, dass die Begegnungen in der nicht-assistierten Baseline-Fahrt über den gesamten Versuch hinweg (Versuchsteile A, B, C) kritisch blieben.

Letztlich ist darauf hinzuweisen, dass diese Studie sich auf frühzeitige Fahrerinformationen bezieht. Die Fahrer haben in diesem Fall, anders als bei dringlichen Fahrerwarnungen, eine gewisse Zeitspanne zur Beobachtung der Verkehrssituation und Verifikation der Richtungsanzeigen. Dementsprechend haben dringliche Warnungen in der Regel ein höheres Aufforderungspotential (d.h. Fahrer sollen zu einer unmittelbaren Brems- oder Lenkreaktion gebracht werden). Zwar wurde in der vorliegenden Studie auch die Dringlichkeit der Fahrerinformationen (visuell vs. visuell-auditiv) variiert, es ist jedoch nicht auszuschließen, dass sich bei noch dringlicheren Warnsignalen ein negativer Effekt falscher Richtungsanzeigen auf das Fahrverhalten finden lässt.

### 6.6.5 Schlussfolgerungen

Aus Basis von Studie III können mehrere abschließende Schlussfolgerungen in Bezug auf die zu erwartenden Effekte bei Einführung des vorgeschlagenen Unterstützungskonzepts getroffen werden. Einerseits sprechen die Ergebnisse von Studienteil A für die Wirksamkeit des in meiner Arbeit vorgeschlagenen Konzepts zur frühzeitigen Fahrerunterstützung. Die Ergebnisse der weiteren Studienteile zeigen, dass dessen Wirksamkeit von der Unzuverlässigkeit der Fahrerunterstützung nur in geringem Umfang negativ beeinflusst wird. Falsche Informationen (d.h. Darbietung von Fahrerinformationen, obwohl tatsächlich kein Konfliktpartner anwesend ist) sowie fehlerhafte Informationen (in diesem Fall: fehlerhafte Anzeige der Richtung, aus welcher der Konflikt droht) führten in dieser Studie vor allem zu

Einschränkungen in der Akzeptanz der Fahrerunterstützung. Die Wirksamkeit (gemessen am Anteil kritischer Begegnungen) gegenüber der nicht-assistierten Fahrten blieb jedoch trotz der Unzuverlässigkeit der Unterstützung erhalten.

Da aufgrund der prädiktiven Natur der Fahrerinformationen in der Praxis technische Unzulänglichkeiten zu erwarten sind (falsche Informationen, fehlerhafte Richtungsanzeigen), kann an dieser Stelle abschließend empfohlen werden, ein rein visuelles Anzeigekonzept einem visuell-auditiven Konzept vorzuziehen. Diese Empfehlung ist darin begründet, dass sich infolge falscher Alarme insbesondere dann Wirksamkeitseinschränkungen zeigten, wenn die Probanden visuell-auditiv informiert wurden (sog. *cry wolf effect*, siehe Teilstudie B), nicht aber bei rein visuellen Informationen. Weiterhin reagierten die Probanden im Fall eines stets korrekt informierenden Systems (Teilstudie A) zwar schneller bei visuell-auditiven als bei rein visuellen Informationen, jedoch führte diese Reaktionszeitdifferenz aufgrund der Frühzeitigkeit der Fahrerunterstützung nicht zu einer Wirksamkeitseinschränkung rein visueller Anzeigen. Die Ergebnisse legen somit nahe, dass auf die zusätzliche visuelle Komponente im Hinblick auf die Wirksamkeit der Fahrerunterstützung verzichtet werden kann. Weiterhin sollte, falls bei der Prädiktion der Konfliktrichtung Unzuverlässigkeiten zu erwarten sind, auf die Anzeige der Konfliktrichtung verzichtet werden, da andernfalls Einschränkungen der subjektiven Nützlichkeit zu erwarten sind.

## 7 Zusammenfassung

Unfälle mit Personenschaden ereignen sich häufig infolge urbaner Verkehrskonflikte (Statistisches Bundesamt, 2013). Die Ursachen für das gehäufte Auftreten von Unfällen in diesen Situationen sind vielfältig, insbesondere können jedoch die hohen Anforderungen an den Fahrer bei der Bewältigung der Fahrsituation genannt werden. In kurzer Zeit müssen die Fahrer in der Lage sein, eine Repräsentation der Verkehrssituation aufzubauen und das Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer richtig einzuschätzen. Beim Durchfahren von Kreuzungen müssen beispielsweise mehrere Elemente der Verkehrssituation (z.B. andere Fahrzeuge, Fußgänger, Radfahrer, Lichtsignalanlagen oder Verkehrszeichen) vom Fahrer parallel beobachtet und fortlaufend hinsichtlich eines Kollisionsrisikos bewertet werden (siehe bspw. Neukum et al., 2014; Werneke & Vollrath, 2012). Werden relevante Verkehrsteilnehmer nicht bemerkt, oder wird das Kollisionsrisiko mit diesen falsch eingeschätzt, können Unfälle oder Beinahe-Unfälle die Folge sein. Sichteinschränkungen durch parkende Fahrzeuge oder dichte Bebauung können die Anforderungen an die Fahreraufmerksamkeit zusätzlich erhöhen (Naujoks et al., 2014).

Um den Fahrer bei der Kollisionsvermeidung aktiv zu unterstützen, sind mittlerweile Assistenzsysteme verfügbar, welche die Verkehrssituation durch fahrzeugeigene Sensorik (z.B. Kameras, Radarsensoren, etc.) überwachen, und den Fahrer im Fall von drohenden Kollisionen warnen oder aktiv in die Fahrzeugführung eingreifen (siehe McGehee et al., 2002; Neukum et al., 2014; Winner, 2009). Beispiele für diese Systeme sind Frontalkollisionswarnungen, Tote-Winkel-Assistenten oder Notbremsassistenten. Aufgrund der eingeschränkten Möglichkeiten bei der Detektion schwer erfassbarer oder verdeckter Verkehrsteilnehmer stoßen heutige Assistenzsysteme bei der Überwachung von komplexen, urbanen Fahrsituationen, wie Verkehrskonflikten an Kreuzungen, an ihre Grenzen.

In meiner Arbeit wurde ein Konzept zur Fahrerunterstützung erarbeitet, welches auf aktuellen Entwicklungen im Bereich der Fahrzeug-Fahrzeug- und Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation basiert, und das Ziel hat, den Fahrer auch in solchen Fahrsituationen effektiv zu unterstützen. Durch sog. *Kooperative Perzeption* (d.h. der Fusionierung von Sensordaten aus Bordsensorik mit anderen Datenquellen, wie Informationen von anderen Fahrzeugen oder infrastruktureller Sensorik) ist es möglich, nahezu das gesamte Verkehrsgeschehen zu erfassen und den Fahrer frühzeitig bei der Vermeidung von Verkehrskonflikten zu unterstützen (Rauch, Klanner, Rasshofer & Dietmayer, 2012). Etablierte Konzepte zur Fahrerunterstützung werden durch diese neue Art der Fahrerassistenz in mehrfacher Hinsicht erweitert. Die Frühzeitigkeit der Fahrerunterstützung und die umfassende Erfassung von Verkehrskonflikten stellen allerdings auch Herausforderungen für die Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle dar. Durch die größere Bandbreite an Verkehrssituationen, in denen der Fahrer unterstützt werden kann, wird möglicherweise eine komplexere Anzeigestrategie erforderlich (z.B. Anzeige der Art des Konfliktpartners oder der Konfliktrichtung, siehe Thoma et al., 2009; Zarife, 2014). Zu komplexe Anzeigestrategien könnten jedoch zu einer Wirksamkeitsminderung der Fahrerunterstützung führen, beispielsweise wenn der kognitive Interpretationsaufwand der Anzeigeelemente zu hoch ist. Im Gegensatz zu heutigen Assistenzsystemen wird weiterhin eine frühzeitige Lenkung der Aufmerksamkeit auf potentielle Verkehrskonflikte ermöglicht. Erfolgt die Information jedoch zu frühzeitig, wird sie möglicherweise als ungerechtfertigt oder unnötig empfunden (Bogenberger et al., 2012; Brown et al., 2001; Werneke et al., 2013). Weiterhin ermöglicht kooperative Umfelderkennung eine Fahrerunterstützung trotz fehlenden Sichtkontakts zum jeweiligen Konfliktpartner (Seeliger et al., 2014). Dadurch wird jedoch eine Fahrerreaktion erforderlich, obwohl eine direkte Verifikation der Fahrerunterstützung durch den Fahrer (d.h. visuelles Überprüfen, ob tatsächlich ein Verkehrskonflikt vorliegt) noch nicht möglich ist.

Kern der vorliegenden Arbeit war es, in einer Studienreihe ein Unterstützungskonzept zu erarbeiten, das den Fahrer unter Berücksichtigung der oben genannten Grenzen optimal bei der Situationsbewältigung mit Hilfe der Darbietung frühzeitiger Informationen über drohende Konfliktsituationen unterstützt. Die Studienreihe bestand aus drei experimentellen Untersuchungen, die jeweils verschiedene inhaltliche Schwerpunkte behandelten. Die

abgeleiteten Gestaltungsempfehlungen werden in den folgenden Abschnitten zusammengefasst.

## 7.1 Gestaltungsempfehlungen

### 7.1.1 Zeitpunkt der Informationsdarbietung

Aufgrund der Ergebnisse aus Studie I und Studie III kann empfohlen werden, die Fahrerinformationen eine bis zwei Sekunden vor dem letztmöglichen Warnzeitpunkt ( $t_{0+1s/2s}$ ) darzubieten. Als letztmöglicher Warnzeitpunkt wird hierbei der Zeitpunkt angenommen, ab welchem dem Fahrer rechnerisch noch eine Sekunde verbleibt, bis er zur Vermeidung der Kollision einen starken Bremsengriff<sup>28</sup> einleiten muss.

In Studie I konnte gezeigt werden, dass ein Präsentationszeitpunkt von einer Sekunde vor dem letztmöglichen Warnzeitpunkt ( $t_{0+1s}$ ) ausreichend ist, um die Fahrer effektiv bei der Vermeidung kritischer Situationen zu unterstützen. Die Kritikalität in den untersuchten Konfliktszenarien sank bei Informationsdarbietung zu diesem Zeitpunkt gegenüber der nicht-assistierten Fahrt signifikant. Dieses Ergebnis konnte in Studie III anhand einer größeren Stichprobe und unter Verwendung eines between-subjects Versuchsdesigns (d.h. unter Ausschluss möglicher Lerneffekte) repliziert werden.

Noch frühzeitigere Anzeigepunkte ( $t_{\text{Information}} > t_{0+1s}$ ) führten zwar in Studie I verglichen mit  $t_{0+1s}$  zu einem noch früheren Bremsbeginn und zu einer geringeren subjektiven Kritikalitätseinschätzung, nicht aber zu einer weiteren Senkung des Anteils objektiv kritischer Situationen. Eine spätere Informationsdarbietung (d.h. zum letztmöglichen Warnzeitpunkt  $t_0$ ) hatte keinen positiven Einfluss auf das Fahrverhalten. Vielmehr fand sich gegenüber der nicht-assistierten Fahrt eine Steigerung im Anteil kritischer Situationen, wenn die Probanden erst zum letztmöglichen Warnzeitpunkt über Konflikte informiert wurden.

### 7.1.2 Spezifität

Im Rahmen von Studie II wurde untersucht, ob die visuelle Komponente der Information eine Darstellung des Konfliktorts (sog. Richtungsspezifität) und des Konfliktpartners (sog. Konfliktspezifität) beinhalten sollte. Auf Basis der Ergebnisse von Studie II kann die Integration einer Anzeige der Richtung, aus welcher ein Konflikt droht, in das Anzeigekonzept empfohlen werden, sofern die Konfliktrichtung zuverlässig erfasst werden kann. Es ist jedoch zu betonen, dass unspezifische Anzeigen (bloße Anzeige, dass ein Konflikt droht) zu vergleichbaren Verhaltenseffekten hinsichtlich des Bremsbeginns und des Anteils kritischer Situationen führten, wie spezifische Anzeigen.

Durch die zusätzliche Anzeige der Konfliktrichtung berichteten die Probanden jedoch von einer höheren Nützlichkeit der Fahrerunterstützung. In Anbetracht dessen, dass die Akzeptanz der Fahrerunterstützung eine Voraussetzung für deren Nutzung darstellt, und richtungsspezifische Informationen auch nicht mit *negativen* Effekten auf Fahrerreaktion und Situationskritikalität einhergingen, kann die Darstellung der Konfliktrichtung empfohlen werden. Diese Empfehlung wird weiterhin dadurch gestützt, dass positive Effekte richtungsspezifischer Anzeigen auf die Aufmerksamkeitsausrichtung, gemessen durch Blickerfassung, in früheren Studien gefunden wurde (Zarife, 2014). Auch die Anzeige der Art des Konfliktpartners führte zu einer höheren subjektiven Nützlichkeit, jedoch berichteten die Fahrer gleichzeitig von einer erhöhten Ablenkungswirkung der Anzeigen. Da auch frühere Studien mehrheitlich keine positiven Effekte konfliktspezifischer Anzeigestrategien auf das Fahrverhalten und die Wirksamkeit der Fahrerunterstützung berichten (Cummings et al., 2007; Thoma et al., 2009; Zarife, 2014), werden konfliktspezifische Informationen auch an dieser Stelle nicht empfohlen.

<sup>28</sup> Hierbei wird von einer konstanten Verzögerung von  $-8 \text{ m/s}^2$  ausgegangen.

Um die Empfehlung richtungsspezifischer Fahrerinformationen in Anbetracht der möglichen Unzuverlässigkeit der Fahrerunterstützung abzusichern, standen in einem Studienteil von Studie III die Auswirkungen fehlerhafter Richtungsanzeigen im Mittelpunkt (d.h. die Richtung des Konfliktpartners wurde in der Hälfte der Situationen fehlerhaft angezeigt). Die Ergebnisse machen deutlich, dass fehlerhafte Richtungsanzeigen zwar nicht mit einer Wirksamkeitseinschränkung der Fahrerunterstützung einhergehen, jedoch die subjektiven Bewertungen der Fahrerunterstützung negativ beeinflussen. Richtungsspezifische Informationen wurden weniger nützlich, weniger gebrauchssicher und visuell beanspruchender eingeschätzt als unspezifische Informationen. Falls mit der Ausgabe fehlerhafter Richtungsanzeigen zu rechnen ist, sollte folglich eine unspezifische Anzeigestrategie vorgezogen werden, um eine Akzeptanzminderung zu vermeiden. Die Empfehlung richtungsspezifischer Anzeigen gilt somit nur für den Fall, dass die Konfliktrichtung zuverlässig erfasst werden kann.

### 7.1.3 Dringlichkeit

In Studie III wurden rein visuelle und visuell-auditive Fahrerinformationen im Hinblick auf deren Wirksamkeit und Akzeptanz verglichen. Dabei wurde erwartet, dass dringliche Anzeigen (visuell-auditiv) zu einer schnelleren Fahrerreaktion führen würden (Kramer et al., 2007). In Anbetracht der Frühzeitigkeit der Informationsdarbietung war jedoch fraglich, ob dies ebenso eine höhere Wirksamkeit der Fahrerunterstützung bedingen würde (Scott & Gray, 2008), da den Fahrern zum Darbietungszeitpunkt noch ausreichend Reaktionszeit zur Verfügung steht.

Auf Basis der Ergebnisse von Studie III kann die Verwendung rein visueller Anzeigen für frühzeitige Fahrerinformationen empfohlen werden. Zwar führten dringliche visuell-auditive Anzeigen wie erwartet zu einer früheren Bremsreaktion als rein visuelle Anzeigen, in Anbetracht der Frühzeitigkeit der Fahrerinformationen war dies allerdings nicht entscheidend für deren Wirksamkeit, da auch rein visuelle Informationen den Anteil kritischer Situationen gegenüber der nicht-assistierten Fahrt signifikant senkten. Die Empfehlung von rein visuellen Ausgaben der Fahrerinformationen wird weiterhin durch die Ergebnisse der zweiten Teilstudie von Studie III gestützt, in der die Auswirkungen falscher (d.h. Informationsausgabe, obwohl kein Konfliktpartner anwesend ist) und unnötiger Informationen (d.h. Informationsausgabe, obwohl sich der prädizierte Konflikt wieder entschärft) auf Fahrverhalten und Akzeptanz untersucht wurden. Falsche Alarme wirkten sich insbesondere bei visuell-auditiven Fahrerinformationen negativ auf die Wirksamkeit der Fahrerunterstützung aus. Die Probanden begannen infolge visuell-auditiver falscher Alarme bei kleineren Abständen zum Konfliktpunkt mit dem Bremsen (verglichen mit den übrigen assistierten Fahrten), wodurch sich der Anteil kritischer Begegnungen verglichen mit der Bedingung mit stets korrekten Informationen erhöhte. Bei rein visuellen Fahrerinformationen kam es nicht zu vergleichbaren Wirksamkeitseinschränkungen durch falsche Alarme.

## 7.2 Ausblick

### 7.2.1 Anwendungsmöglichkeiten

Fahrerassistenz auf Basis kooperativer Kommunikationstechnologien steht momentan in einer Phase der Erprobung. Aktuell werden erste Maßnahmen zur flächendeckenden Einführung dieser Technologien unternommen. Neben der Forschung durch Automobilhersteller, die auch maßgeblich an den Forschungsprojekten „Ko-PER“ (siehe [www.kofas.de](http://www.kofas.de)) oder „sim<sup>TD</sup>“ (siehe [www.simtd.de](http://www.simtd.de)), in denen kooperative Warn- und Informationskonzepte entwickelt und evaluiert wurden, beteiligt waren, wird die momentane Weiterentwicklung kooperativer Assistenzsysteme auch durch die Betreiber der Verkehrsinfrastruktur im Rahmen öffentlicher Forschung vorangetrieben. Ab 2015 sollen

beispielsweise im Rahmen des sogenannten „Cooperative ITS Corridor“<sup>29</sup> kooperative Assistenzfunktionen auf der Autobahnstrecke Rotterdam-Frankfurt am Main-Wien erprobt werden, wie etwa Baustellenwarnungen (bspw. Übermittlung von Informationen über exakte Positionen von Baustellen und befahrbare Fahrstreifen) oder Verbesserungen des Verkehrsmanagements (bspw. Übermittlung von Informationen über Fahrgeschwindigkeiten und Witterungsbedingungen). Mehrere europäische Städte (z.B. Bordeaux, Kopenhagen und Verona) planen außerdem innerhalb des von der EU geförderten Projekts „Compass4D“ (siehe [www.compass4d.eu](http://www.compass4d.eu)) ebenfalls die Einführung von auf kooperativer Umfelderkennung basierenden Assistenzfunktionen mit einer Fahrzeugflotte von 300 Fahrzeugen. Hierbei sollen Assistenzfunktionen wie Ampelphasenassistenz oder kooperative Gefahrenwarnungen im urbanen Umfeld implementiert und im alltäglichen Verkehr erprobt werden.

Diese aktuellen Entwicklungen bieten direkte Anknüpfungspunkte der innerhalb meiner Arbeit gewonnenen Erkenntnisse zur Gestaltung frühzeitiger Fahrerinformationen. Die Ergebnisse dieser Arbeit liefern möglicherweise einen entscheidenden Beitrag dazu, dass kooperative Fahrerinformationen und -warnungen zukünftig effektiv zur Unfallvermeidung beitragen können. Die auf umfassenden empirischen Studien basierenden Gestaltungsempfehlungen können einerseits dazu verwendet werden, eine frühzeitige Fahrerunterstützung zu entwickeln, die dem fahrerseitigen Unterstützungsbedarf entspricht (bspw. hinsichtlich der zeitlichen Gestaltung und der Spezifität des Anzeigekonzepts) und durch die gewonnenen Erkenntnisse dieser Arbeit eine hohe Wirksamkeit erzielt.

Da davon ausgegangen werden kann, dass eine Steigerung der Verkehrssicherheit durch Fahrerinformationen über drohende Verkehrskonflikte nur dann eintreten wird, wenn die kooperative Fahrerunterstützung auch genutzt wird, kann die Akzeptanz frühzeitiger Fahrerinformationen als entscheidender Faktor für deren erfolgreiche Markteinführung angesehen werden. Auch hierfür stellt die konkrete Ausgestaltung des Anzeigekonzepts eine bedeutende Rolle dar. Die Ergebnisse dieser Arbeit können in mehrfacher Hinsicht dazu dienen, die Akzeptanz der Fahrerinformationen durch die Berücksichtigung der Grenzen kooperativer Umfelderkennung zu erhöhen. Die Gestaltungsempfehlung von einer Sekunde vor dem letztmöglichen Warnzeitpunkt zielt beispielsweise darauf ab, falsche und unnötige Fahrerinformationen zu vermeiden bzw. deren Häufigkeit zu mindern. Die Ergebnisse legen nahe, dass eine geringe Falschalarmrate wesentlich zur Akzeptanz der Fahrerunterstützung im alltäglichen Verkehr beitragen dürfte. Spezifische Anzeigekonzepte (bspw. Anzeige der Konfliktrichtung oder des Konfliktpartners) sollten außerdem nur dann verwendet werden, wenn nicht mit dem Vorkommen fehlerhafter Anzeigen gerechnet werden muss, um negative Auswirkungen auf die subjektive Beurteilung der Nützlichkeit der Fahrerunterstützung zu vermeiden.

## 7.2.2 Forschungsbedarf

Kooperative Assistenzsysteme eröffnen vielfältige Möglichkeiten zur Erforschung neuartiger Ansätze der Mensch-Maschine-Interaktion. Weiterführender Forschungsbedarf in Bezug auf die in meiner Arbeit untersuchten frühzeitigen Fahrerinformationen lässt sich insbesondere im Hinblick auf die erweiterten Möglichkeiten zur Fahrerunterstützung durch neue Anzeigetechnologien im Fahrzeug ableiten. Es besteht außerdem weiterführender Forschungsbedarf bezüglich sogenannter Verhaltensanpassungen durch die Fahrerunterstützung, und damit der Frage, ob diese im Alltagsgebrauch zu nicht-intendierten, negativen Effekten auf das Fahrverhalten führen kann.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Fahrer visuell-auditiv über bevorstehende Konfliktsituationen informiert. Dies erfolgte durch die Anzeige von Piktogrammen im

<sup>29</sup> Eine Projektbeschreibung ist verfügbar unter:

[http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/Strasse/flyer-eurokorridor-cooperative-its-corridor-in-deutsch.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/Strasse/flyer-eurokorridor-cooperative-its-corridor-in-deutsch.pdf?__blob=publicationFile) [zuletzt geöffnet am 03.05.2015]

simulierten Head-Up Display (HUD), welche die Art und die Richtung des Konflikts beinhalteten. Die verwendete Anzeigestrategie kann als sog. *endogener Cue* (siehe Kapitel 3.2.1) zur Lenkung der Aufmerksamkeit auf einen bestimmten Verkehrskonflikt aufgefasst werden. Die Ergebnisse der Arbeit legen nahe, dass die Wirksamkeit eines solchen Anzeigekonzepts durch spezifische Informationen über die jeweilige Konfliktsituation nicht wesentlich gesteigert wird. Durch zukünftige Entwicklungen wird die Darstellung von sog. kontaktanalogen Anzeigen im Head-Up Display möglich, anhand derer Hinweise und Warnungen direkt in das Blickfeld des Fahrers projiziert werden können (Li & Nashashibi, 2011; Plavšić et al., 2009; Schall et al., 2013). Hierdurch wird die Anzeige sog. *exogener Cues* möglich (bspw. Markierung des jeweiligen Konfliktpartners in der Windschutzscheibe), die möglicherweise zu einer Steigerung der Verhaltenswirksamkeit spezifischer Anzeigekonzepte führen. Andererseits weisen Studien aus der Luftfahrt darauf hin, dass solche kontaktanalogen Anzeigen (bspw. Anzeige des Flugkorridors oder Markierung von Zielen in der militärischen Luftfahrt) einen sog. „*attentional tunneling effect*“ mit sich bringen können. Die Entdeckung und adäquate Reaktion auf unerwartete Gefahren, die nicht im kontaktanalogen HUD angezeigt werden, wird durch eine zu starke Aufmerksamkeitsfokussierung auf die kontaktanaloge Anzeige möglicherweise erschwert (Wickens & Alexander, 2009; Yeh & Wickens, 2001). Eine weitere Möglichkeit zur Steigerung der Wirksamkeit des Anzeigekonzepts liegt eventuell in der Verwendung spezifischerer auditiver Komponenten der Fahrerunterstützung. In dieser Arbeit wurden durchgehend (Studie I bis Studie III) unspezifische Hinweistöne verwendet, die keine Information über den drohenden Verkehrskonflikt beinhalteten (sog. *accessory stimuli*), während in anderen Arbeiten zu Fahrerwarnkonzepten spezifische Töne zum Einsatz kamen (bspw. konfliktspezifische Warntöne oder räumlich gerichtete Warntöne, siehe bspw. Fricke, 2009; Zarife, 2014; Zarife et al., 2012). Eine Kombination des in dieser Arbeit vorgeschlagenen Anzeigekonzepts mit einer spezifischen auditiven Komponente könnte dessen Verhaltenswirksamkeit möglicherweise weiter steigern.

Neben der weiteren Optimierung des Anzeigekonzepts für frühzeitige Fahrerinformationen ist insbesondere die Frage von Interesse, ob sich durch die Einführung einer solchen Fahrerunterstützung im alltäglichen Verkehr nicht-intendierte Verhaltenseffekte ergeben würden, welche die positiven Auswirkungen der Fahrerunterstützung auf die Verkehrssicherheit abschwächen oder sogar gänzlich unterbinden könnten. Werden Fahrer über drohende Verkehrskonflikte während assistierten Fahrten nicht informiert (sog. verpasster Alarm) könnte es beispielsweise zu einer Minderung der Verkehrssicherheit gegenüber Fahrten ohne Fahrerunterstützung kommen (Mahr et al., 2010). Ein Grund hierfür liegt womöglich darin, dass Fahrer durch die Unterstützungsmöglichkeit aufgrund eines zu starken Vertrauens auf die Fahrerassistenz (Rudin-Brown & Parker, 2004) oder aufgrund einer wahrgenommenen Steigerung der Fahrsicherheit (Fuller, 1984; Näätänen & Summala, 1976) zu einem risikoreicheren Fahrstil neigen. Sogenannte nicht-intendierte Verhaltensanpassung (OECD, 1990) durch die Einführung von Fahrerassistenzsystemen wurden bereits mehrfach für verschiedene Fahrerassistenzsysteme nachgewiesen (Burns, Knabe & Tevell, 2000; de Winter et al., 2014; Dragutinovic et al., 2005; Naujoks & Totzke, 2014; Rudin-Brown & Parker, 2004). Auch in Bezug auf prädiktive Warnsysteme wurde beispielsweise eine Erhöhung der Geschwindigkeit, ein Einhalten kleinerer Folgeabstände sowie eine vermehrte Beschäftigung mit fahrfremden Tätigkeiten infolge der Unterstützungsmöglichkeit gefunden (Naujoks & Totzke, 2014). Ob dies die Wirksamkeit der Fahrerunterstützung tatsächlich einschränkt, wird sich vermutlich nur auf Basis umfangreicher Feldstudien klären lassen.

## 8 Referenzen

### 8.1 Einbettung der Arbeit und Veröffentlichungen

Diese Arbeit entstand zum Teil im Rahmen des Projekts „Kooperative Perzeption (Ko-PER)“, welches am Interdisziplinären Zentrum für Verkehrswissenschaften (IZVW) an der Universität Würzburg durchgeführt wurde. Das Projekt Ko-PER wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie unter dem Kennzeichen 19S9022C gefördert. Eine zusammenfassende Veröffentlichung der Arbeiten ist in folgendem Abschlussbericht geplant<sup>30</sup>:

- Naujoks F. und Neukum, A. (*in press*). *Forschungsinitiative Ko-FAS – Verbundprojekt Ko-PER, Schlussbericht des Interdisziplinären Zentrums für Verkehrswissenschaften (IZVW)*. Technische Informationsbibliothek Hannover: Hannover.

Der Autor dieser Arbeit war hauptverantwortlich für die Leitung und Bearbeitung aller Studien tätig. Zusätzlich zum Abschlussbericht resultierten mehrere Beiträge in Workshops und Tagungen. Die Daten der Studien wurden für diese Arbeit komplett neu ausgewertet und dargestellt. Die Veröffentlichungen sollen an dieser Stelle der Vollständigkeit halber genannt werden. Im Einzelnen sind dies (in Klammern am Ende der Veröffentlichung: Angabe der jeweils thematisierten empirischen Studie):

- Naujoks, F. & Neukum, A. (2014). Timing of in-vehicle advisory warnings based on cooperative perception. In D. de Waard, K. Brookhuis, R. Wiczorek, F. di Nocera, R. Brouwer, P. Barham, C. Weikert, A. Kluge, W. Gerbino, & A. Toffetti (Eds.), *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Europe Chapter Annual Meeting* (S.1-13). (Studie I: Zeitpunkt)
- Naujoks, F. & Neukum, A., (2014). Specificity and timing of advisory warnings based on cooperative perception. In: Butz, A., Koch, M. & Schlichter, J. (Hrsg.), *Mensch & Computer 2014 – Workshopband* (S. 229-238). Berlin: De Gruyter Oldenbourg. (Studie II: Spezifität)
- Naujoks, F., Grattenthaler, H. & Neukum, A. (2012). Zeitliche Gestaltung effektiver Fahrerinformationen zur Kollisionsvermeidung auf der Basis kooperativer Perzeption. In K. Dietmayer, K. Bengler, B. Färber, M. Maurer, C. Stiller & H. Winner (Hrsg.), *8. Workshop Fahrerassistenzsysteme – FAS 2012* (S. 107-117). Darmstadt: Uni-DAS e.V. (Studie I: Zeitpunkt)

Innerhalb des Forschungsprojekts entstanden weitere Studien, die nicht in dieser Arbeit thematisiert werden. Aus diesen gingen die folgenden Veröffentlichungen hervor, die auch an dieser Stelle der Vollständigkeit halber erwähnt werden:

- Seeliger, F., Weidl, G., Petrich, D., Naujoks, F., Breuel, G., Neukum, A. & Dietmayer, K. (2014). Advisory Warnings Based on Cooperative Perception. In Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE (Ed.), *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium* (pp. 246-252). Dearborn: IEEE.
- Naujoks, F., Grattenthaler, H. & Neukum, A. (2013). Fahrerseitiger Unterstützungsbedarf in drohenden Verkehrskonfliktszenarien und Wirksamkeitsuntersuchung frühzeitiger Fahrerinformationen basierend auf kooperativer Umfelderkennung. In E. Brandenburg, L. Doria, A. Gross, T. Günzler. &

---

<sup>30</sup> Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieser Arbeit befand sich der Abschlussbericht noch im Druck und war nicht veröffentlicht.

H. Smieszek (Hrsg.), *Proceedings of the 10. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme* (S. 397-407). Berlin: ZMMS.

## 8.2 Literaturverzeichnis

- Abe, G. & Richardson, J. (2004). The effect of alarm timing on driver behaviour: an investigation of differences in driver trust and response to alarms according to alarm timing. *Transportation Research Part F*, 7, 307–322.
- Abe, G. & Richardson, J. (2005). The influence of alarm timing on braking response and driver trust in low speed driving. *Safety Science*, 43, 639–654.
- Abe, G. & Richardson, J. (2006). Alarm timing, trust and driver expectation for forward collision warning systems. *Applied Ergonomics*, 37, 577–586.
- Adell, E., Várhelyi, A., Alonso, M. & Plaza, J. (2008). Developing HMI components for a driver assistance system for safe speed and safe distance. *IET Intelligent Transportation Systems*, 2, 1-14.
- Alegria-Iscoa, J. (1975). Sequential effects of foreperiod duration: some strategical factors in tasks involving time uncertainty. In P.M.A. Rabbitt & S. Dornic (Eds.), *Attention and Performance V* (pp. 1-10). London: Academic Press.
- Becker, S., Brockmann, M., Jung, C., Mihm, J., Schollinski, H.-L., Schwarz, J. & Winkle, T. (2004). *RESPONSE 2 - Final Report: ADAS - from market introduction scenarios towards a code of practice for development and evaluation: RESPONSE 2 - Deliverable D4*.
- Berger, A., Henik, A. & Rafal, R. (2005). Competition between endogenous and exogenous orienting of visual attention. *Journal of Experimental Psychology: General*, 134 (2), 207-221.
- Bernstein, I. H., Rose, R. & Ashe, V. (1970). Preparatory state effects in intersensory facilitation. *Psychonomic Science*, 19 (2), 113-114.
- Bliss, J. P. & Acton, S. A. (2003). Alarm mistrust in automobiles: How collision alarm reliability affects driving. *Applied Ergonomics*, 34, 499-509.
- Bogenberger, K., Dinkel, A., Totzke, I., Naujoks, F. & Mühlbacher, D. (2012). *Sicherheitswirkungen von Verkehrsinformationen* (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe F84). Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW.
- Böhm, M., Fuchs, S., Pfliegl, R. & Kölbl, R. (2009). Driver behavior and user acceptance of cooperative systems based on infrastructure-to-vehicle communication. *Transportation Research Record*, 2129, 136-144.
- Breznitz, S. (1983). *Cry-wolf: The psychology of false alarms*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Broadbent, D. E. (1958). *Perception and communication*. New York: Pergamon Press.
- Broadbent, D. E. (1982). Task combination and selective intake of information. *Acta Psychologica*, 50 (3), 253-290.
- Brown, T. L., Lee, J. D. & McGehee, D. V. (2000). Attention based model of driver performance in rear-end-collisions. *Transportation Research Record*, 1724, 14-21.
- Brown, T. L., Lee, J. D. & McGehee, D. V. (2001). Human performance models and rear-end collision avoidance algorithms. *Human Factors*, 43 (3), 462-482.
- Burns, P. C., Knabe, E. & Tevell, M. (2000). *Driver behavioral adaptation to collision warning and avoidance information*. Paper presented at the Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, San Diego, CA.

- Bustamante, E. A. (2008). Implementing likelihood alarm technology in integrated aviation displays for enhancing decision-making: A two-stage signal detection modeling approach. *The International Journal of Applied Aviation Studies*, 8 (2), 241-260.
- Cacciabue, P. C. & Martinetto, M. (2006). A user-centred approach for designing driving support systems: the case of collision avoidance. *Cognition, Technology and Work*, 8 (3), 201–214.
- Campbell, J. L., Carney, C. & Kantowitz, B. H. (1997). *Human factors design guidelines for advanced traveler information systems (ATIS) and commercial vehicle operations (CVO)* (Technical Report FHWA-RD-98-057). Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- Campbell, J. L., Richard, C. M., Brown, J. L. & McCallum, M. (2007). *Crash warning system interfaces: Human factors insights and lessons learned* (No. HS 810 697). Washington, D.C: National Highway Traffic Safety Administration.
- Cao, Y., Mahr, A., Castronovo, S., Theune, M., Stahl, C. & Müller, C. (2010). Local danger warnings for drivers: The effect of modality and level of assistance on driver reaction. In C. Rich, Q. Yang, M. Cavazza & M. X. Zhou (Eds.), *Proceedings of the International Conference on Intelligent User Interfaces (IUI 2010)* (pp. 239–248). Hong Kong: ACM.
- Chapman, P., Underwood, G. & Roberts, K. (2002). Visual search patterns in trained and untrained novice drivers. *Transportation Research Part F*, 5 (2), 157-167.
- COMSIS Corporation. (1996). *Preliminary human factors guidelines for crash avoidance warning devices* (NHTSA Project No. DTNH22-91-07004). Silver Spring, MD: COMSIS.
- Cotté, N., Meyer, J. & Coughlin, J. F. (2001). Older and younger driver's reliance on collision warning systems. In *Proceedings of the 45th Annual Meeting of the Human Factor Society* (pp. 277-280). Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society.
- Courage, C., Milgram, P. & Smiley, A. (2000). *An investigation of attentional demand in a simulated driving environment*. Paper presented at the Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, San Diego, CA.
- Cummings, M. L., Kilgore, R. M., Wang, E. & Kochhar, D. S. (2007). Effects of single versus multiple warnings on driver performance. *Human Factors*, 49 (6), 1097–1106.
- Davis, F. D. (1986). *A technology acceptance model for empirically testing new end-user information systems: Theory and results*. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology.
- Davis, F. D. (1989). Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. *MIS quarterly*, 319-340.
- Davison, H. J. & Wickens, C. D. (2001). *Rotorcraft hazard cueing: The effects on attention and trust*. Paper presented at the 11th International Symposium on Aviation Psychology, Columbus, OH.
- de Winter, J., Happee, R., Martens, M. H. & Stanton, N. A. (2014). Effects of adaptive cruise control and highly automated driving on workload and situation awareness: A review of the empirical evidence. *Transportation Research Part F*, 27B, 196-217.
- Dingus, T. A., Jahns, S. K., Horowitz, A. D. & Knippling, R. (1998). Human factors design issues for crash avoidance systems. In N. V. Barfield & A. Dingus (Eds.), *Human factors in intelligent transportation systems* (pp. 55-94). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Donges, E. (1982). Aspekte der Aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen. *Automobil-Industrie*, 27, 193-222.

- Dragutinovic, N., Brookhuis, K. A., Hagenzieker, M. P. & Marchau, V. (2005). Behavioural effects of Advanced Cruise Control Use – a meta-analytic approach. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 5 (4), 267-280.
- Duncan, J. (1984). Selective attention and the organization of visual information. *Journal of Experimental Psychology: General*, 113 (4), 501-517.
- Dzindolet, M. T., Peterson, S. A., Pomranky, R. A., Pierce, L. G. & Beck, H. P. (2003). The role of trust in automation reliance. *International Journal of Human-Computer Studies*, 58 (6), 697-718.
- EN ISO 15008:2003 (2003). *Straßenfahrzeuge — Ergonomische Aspekte von Fahrerinformations- und Assistenzsystemen — Anforderungen und Bewertungsmethoden der visuellen Informationsdarstellung im Fahrzeug*. Genf: ISO
- Fernandez-Duque, D. & Posner, M. I. (1997). Relating the mechanisms of orienting and alerting. *Neuropsychologia*, 35 (4), 477-486.
- Fricke, N. (2009). *Gestaltung zeit- und sicherheitskritischer Warnungen im Fahrzeug*. Dissertation, Technische Universität Berlin.
- Fuerstenberg, K., Hopstock, M., Andrzej, O., Bernd, R., Chen, J., Deutschle, S., Benson, C., Weingart, J. & de Lara, A. C. M. (2007). *INTERSAFE Final Report (Project Evaluation and Effectiveness of the Intersection Safety System)*. Brussels: Intersafe Consortium.
- Fuller, R. (1984). A conceptualization of driving behaviour as threat avoidance. *Ergonomics*, 27 (11), 1139-1155.
- Getty, D. J., Swets, J. A., Pickett, R. M. & Gonthier, D. (1995). System operator response to warnings of danger: A laboratory investigation of the effects of the predictive value of a warning on human response time. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 1 (1), 19-33.
- Green, D. M. & Swets, J. A. (1966). Signal detection theory and psychophysics. *Psychological Bulletin*, 75, 424-429.
- Green, M. (2000). "How Long Does It Take to Stop?" Methodological Analysis of Driver Perception-Brake Times. *Transportation Human Factors*, 2 (3), 195-216.
- Green, P., Levison, W., Paelke, G. & Serafin, C. (1993). *Preliminary human factors guidelines for driver information systems* (Technical Report UMTRI-93-21). Ann Arbor, MI: The University of Michigan Transportation Research Institute
- Gupta, N., Bisantz, A. M. & Singh, T. (2002). The effects of adverse condition warning system characteristics on driver performance: An investigation of alarm signal type and threshold level. *Behavior and Information Technology*, 21 (4), 235-248.
- Hackley, S. A. & Valle-Inclán, F. (2003). Which stages of processing are speeded by a warning signal? *Biological psychology*, 64 (1), 27-45.
- Hayward, J. C. (1972). Near miss determination through use of a scale of danger, *Highway Research Record*, 384, 24-34.
- Herzberg, L. (2012). „Achtung, Gefahr lauert hinter der Ecke!“ *Effektivität von Warnungen mit unterschiedlichem Informationsgehalt für den Kreuzungsbereich basierend auf Car-to-X-Technologie*. Bachelorarbeit, Technische Universität Braunschweig.
- Ho, A. W. L. & Cummings, M. L. (2005). *Multiple alarms and driving situational awareness*. Cambridge: MIT, Department of Aeronautics and Astronautics.
- Ho, C., Reed, N. & Spence, C. (2007). Multisensory in-car warning signals for collision avoidance. *Human Factors*, 49 (6), 1107-1114.
- Hoffmann, E. R. & Mortimer, R. G. (1994). Drivers' estimates of time to collision. *Accident Analysis & Prevention*, 26 (4), 511-520.

- Hoffmann, J. & Gayko, J. (2012). Fahrerwarnelemente. In H. Winner, S. Hakuli & G. Wolf (Eds.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (pp. 343-354). Wiesbaden: Veweg & Teubner.
- Hoffmann, S. & Buld, S. (2006). Darstellung und Evaluation eines Trainings zum Fahren in der Fahrsimulation. In VDI Wissensforum (Ed.), *Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme* (pp. 113-132). Düsseldorf: VDI Verlag.
- Horrey, W. J., Wickens, C. D. & Consalus, K. P. (2006). Modeling drivers' visual attention allocation while interacting with in-vehicle technologies. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 12 (2), 67-78.
- Humphreys, G. W. (1981). Flexibility of attention between stimulus dimensions. *Perception & psychophysics*, 30 (3), 291-302.
- International Harmonized Research Activities (IHRA) working group on Intelligent Transport Systems (ITS). (2008). *Statement of principles on the design of high-priority warning signals for in-vehicle intelligent transport systems – draft* (Informal Document Number ITS-16-03).
- ISO 15006:2004 (E) (2004). *Road vehicles - Ergonomic aspects of transport information and control systems - Specifications and compliance procedures for in-vehicle auditory presentation*. Genf: ISO.
- ISO 15623:2013 (E) (2013). *Intelligent transport systems- Forward vehicle collision warning systems - Performance requirements and test procedures*. Genf: ISO.
- ISO/TR 16352:2005. (2005). *Road vehicles — Ergonomic aspects of in-vehicle presentation for transport information and control systems — Warning systems*. Genf: ISO.
- Jonides, J. (1981). Voluntary versus automatic control over the mind's eye's movement. In J.B. Long & A.D. Baddeley (Eds), *Attention and performance IX* (pp. 187-203). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Karlin, L. (1959). Reaction time as a function of foreperiod duration and variability. *Journal of Experimental Psychology*, 58 (2), 185-191.
- Kestin, I., Miller, B. R. & Lockhart, C. H. (1988). Auditory alarms during anesthesia monitoring. *Anesthesiology*, 69 (1), 106-109.
- Kiesel, A. & Miller, J. (2007). Impact of contingency manipulations on accessory stimulus effects. *Perception & Psychophysics*, 69 (7), 1117-1125.
- Kingstone, A. (1992). Combining expectancies. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 44 (1), 69-104.
- Kirschenbaum, S. S. & Arruda, J. E. (1994). Effects of graphic and verbal probability information on command decision making. *Human Factors*, 36 (6), 406-418.
- Klein, R. M. & Hansen, E. (1990). Chronometric analysis of apparent spotlight failure in endogenous visual orienting. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16 (4), 790.
- Kolb, L. (2013). *Gestaltung und Evaluierung einer Mensch-Maschine Schnittstelle zur Entschärfung urbaner Verkehrskonflikte basierend auf C2X-Kommunikation*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit, Universität Würzburg.
- Koornstra, M. J. (1993). Safety relevance of vision research and theory. In A. G. Gale (Ed.), *Vision in Vehicles IV* (pp. 3-13). Amsterdam: Elsevier.
- Kragt, H. & Bonten, J. (1983). Evaluation of a conventional process-alarm system in a fertilizer plant. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 13 (4), 586-600.

- Kramer, A. F., Cassavaugh, N., Horrey, W. J., Becic, E. & Mayhugh, J. L. (2007). Influence of age and proximity warning devices on collision avoidance in simulated driving. *Human Factors*, 49 (5), 935-949.
- Lambert, A. J. (1985). Selectivity and stages of processing — An enduring controversy in attentional theory: A review. *Current Psychology*, 4 (3), 239-256.
- Lambert, A. J. & Hockey, R. (1986). Selective attention and performance with a multidimensional visual display. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 12 (4), 484.
- Lawless, S. T. (1994). Crying wolf: false alarms in a pediatric intensive care unit. *Critical care medicine*, 22 (6), 981-985.
- Lee, D. N. (1976). A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision. *Perception*, 5 (4), 437-459.
- Lee, J. D., Hoffman, J. D. & Hayes, E. (2004). Collision warning design to mitigate driver distraction. In J. Herbsleb & G. Olson (Eds.), *Proceedings of the 2004 ACM conference on Computer supported cooperative work* (pp. 65-72). New York: ACM.
- Lee, J. D., McGehee, D. V., Brown, T. L. & Reyes, M. L. (2002). Collision warning timing, driver distraction, and driver response to imminent rear-end collisions in a high-fidelity driving simulator. *Human Factors*, 44 (2), 314-334.
- Lee, J. D. & Moray, N. (1992). Trust, control strategies and allocation of function in human-machine systems. *Ergonomics*, 35 (10), 1243-1270.
- Lee, J. D. & See, K. A. (2004). Trust in automation: Designing for appropriate reliance. *Human Factors*, 46 (1), 50-80.
- Lees, M. N. & Lee, J. D. (2007). The influence of distraction and driving context on driver response to imperfect collision warning systems. *Ergonomics*, 50 (8), 1264-1286.
- Lenné, M. G. & Triggs, T. J. (2008). Detection of emergency vehicles: Driver responses to advance warning in a driving simulator. *Human Factors*, 50 (1), 135-144.
- Lenné, M. G. & Triggs, T. J. (2009). Warning drivers of approaching hazards: The importance of location cues and multi-sensory cues. In D. De Waard, J. Godthelp, F. L. Kooi & K. Brookhuis (Eds.), *Human Factors, Security and Safety* (pp. 203-211). Maastricht: Shaker Publishing.
- Li, H. & Nashashibi, F. (2011). *Multi-vehicle cooperative perception and augmented reality for driver assistance: A possibility to 'see' through front vehicle*. Paper presented at 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Washington, DC.
- Lu, Z.L. & Doshier, B. A. (1998). External noise distinguishes attention mechanisms. *Vision research*, 38 (9), 1183-1198.
- Mahr, A., Cao, Y., Theune, M., Schwartz, T. & Müller, C. (2010). What if it suddenly fails? Behavioural aspects of advanced driver assistant systems on the example of local danger alerts. In H. Coelho, R. Studer & M. Wooldridge (Eds.), *Proceedings of 19th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI 2010) - Frontiers in Artificial Intelligence and Applications* (pp. 1051-1052). Lissabon: IOS Press.
- Martens, M. H. & Jenssen, G. D. (2012). Behavioral Adaptation and Acceptance. In A. Eskandarian (Ed.), *Handbook of Intelligent Vehicles* (pp. 117-138). London: Springer.
- Masalonis, A. J. & Parasuraman, R. (1999). Trust as a Construct for Evaluation of Automated Aids: Past and Future Theory and Research. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 43, 184-187.

- McGehee, D. V., Brown, T. L., Lee, J. D. & Wilson, T. B. (2002). Effect of warning timing on collision avoidance behavior in a stationary lead vehicle scenario. *Transportation Research Record*, 1803, 1-6.
- McLeod, R. W. & Ross, H. E. (1983). Optic-flow and cognitive factors in time-to-collision estimates. *Perception*, 12 (4), 417-423.
- Meredith, C. & Edworthy, J. (1995). Are there too many alarms in the intensive care unit? An overview of the problems. *Journal of Advanced Nursing*, 21 (1), 15-20.
- Meyer, J. (2004). Conceptual issues in the study of dynamic hazard warnings. *Human Factors*, 46 (2), 196-204.
- Miller, J., Franz, V. & Ulrich, R. (1999). Effects of auditory stimulus intensity on response force in simple, go/no-go, and choice RT tasks. *Perception & psychophysics*, 61 (1), 107-119.
- Miller, J. & Van Nes, F. (2007). Effects of response task and accessory stimuli on redundancy gain: tests of the hemispheric coactivation model. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 33 (4), 829-844.
- Montgomery, D. A. (1999). Human sensitivity to variability information in detection decisions. *Human Factors*, 41 (1), 90-105.
- Montgomery, D. A. & Sorkin, R. D. (1996). Observer sensitivity to element reliability in a multielement visual display. *Human Factors*, 38 (3), 484-494.
- Mourant, R. R. & Rockwell, T. H. (1972). Strategies of visual search by novice and experienced drivers. *Human Factors*, 14 (4), 325-335.
- Muhrer, E. & Vollrath, M. (2010). Expectations while car following - the consequences for driving behaviour in a simulated driving task. *Accident Analysis and Prevention*, 42, 2158-2164.
- Näätänen, R. (1970). The diminishing time-uncertainty with the lapse of time after the warning signal in reaction-time experiments with varying fore-periods. *Acta Psychologica*, 34, 399-419.
- Näätänen, R. & Summala, H. (Eds.). (1976). *Road-user behavior and traffic accidents*. Amsterdam: North-Holland Publishing Company.
- Nakano, Y. (2002). Transient and sustained effects of an auditory accessory stimulus in a visual go/no go task. *Perceptual and motor skills*, 95 (2), 599-605.
- Naujoks, F., Grattenthaler, H. & Neukum, A. (2014). *Effectiveness of advisory warnings based on cooperative perception*. Paper presented at the 10th ITS European Congress, Helsinki, Finland.
- Naujoks, F. & Totzke, I. (2014). Behavioral adaptation caused by predictive warning systems—The case of congestion tail warnings. *Transportation Research Part F*, 26, 49-61.
- Neely, J. H. (1977). Semantic priming and retrieval from lexical memory: Roles of inhibitionless spreading activation and limited-capacity attention. *Journal of Experimental Psychology: General*, 106 (3), 226-254.
- Nees, M. A. & Walker, B. M. (2011). Auditory displays for in-vehicle technologies. *Reviews of Human Factors and Ergonomics*, 7 (1), 58-99.
- Neukum, A. (2011). *Wenn das Fahrzeug mehr sieht als der Fahrer – Konsequenzen für die Gestaltung der Fahrer-Fahrzeug Schnittstelle*. Paper presented at the Ko-FAS Zwischenpräsentation, Aschaffenburg, Germany.
- Neukum, A. & Krüger, H.-P. (2003). Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen - Untersuchungsmethodik und Bewertungskriterien. *VDI-Berichte*, 1791, 297-318.

- Neukum, A., Lübbecke, T., Krüger, H.-P., Mayser, C. & Steinle, J. (2008). ACC-Stop&Go: Fahrerverhalten an funktionalen Systemgrenzen. In M. Maurer & C. Stiller (Eds.), 5. *Workshop Fahrerassistenzsysteme - FAS 2008* (pp. 141-150). Karlsruhe: fmrt.
- Neukum, A., Naujoks, F., Kappes, S. & Wey, T. (2014). Kontrollierbarkeit unerwarteter Eingriffe eines Bremsassistenzsystems aus Perspektive des Folgeverkehrs. In B. Färber, K. Dietmayer, K. Bengler, M. Maurer, C. Stiller & H. Winner (Eds.), 9. *Workshop Fahrerassistenzsysteme – FAS 2014* (pp. 115-126). Walting: Uni-DAS.
- Niemi, P. & Näätänen, R. (1981). Foreperiod and simple reaction time. *Psychological Bulletin*, 89 (1), 133-162.
- OECD (1990). *Behavioural adaptations to changes in the road transport system*. Paris: Organization for Economic Co-operation and Development.
- Plavšić, M., Duschl, M., Tönnis, M., Bubb, H. & Klinker, G. (2009). *Ergonomic Design and Evaluation of Augmented Reality Based Cautionary Warnings for Driving Assistance in Urban Environments*, Paper presented at the IEA Conference 2009.
- Politis, I., Brewster, S. & Pollick, F. (2013). *Evaluating multimodal driver displays of varying urgency*. Paper presented at the Proceedings of the 5th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, Eindhoven, the Netherlands.
- Posner, M. I. (1980). Orienting of attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 32 (1), 3-25.
- Posner, M. I., Nissen, M. J. & Klein, R. M. (1976). Visual dominance: an information-processing account of its origins and significance. *Psychological Review*, 83 (2), 157-172.
- Posner, M. I., Nissen, M. J. & Ogden, W. C. (1978). Attended and unattended processing modes: The role of set for spatial location. In H.L. Pick & E. Saltzman (Eds.), *Modes of perceiving and processing information* (1-18), New York: Erlbaum.
- Posner, M. I., Snyder, C. R. & Davidson, B. J. (1980). Attention and the detection of signals. *Journal of experimental psychology: General*, 109 (2), 160-174.
- Posner, M. I. & Snyder, C. R. R. (1975). Facilitation and inhibition in the processing of signals. In P.M.A. Rabbitt & S. Dornic (Eds.), *Attention and Performance V* (pp. 669-682). London: Academic Press.
- Pradhan, A. K., Hammel, K. R., De Ramus, R., Pollatsek, A., Noyce, D. A. & Fisher, D. L. (2005). Using eye movements to evaluate effects of driver age on risk perception in a driving simulator. *Human Factors*, 47 (4), 840-852.
- Pritchett, A. R. (2001). Reviewing the role of cockpit alerting systems. *Human Factors and Aerospace Safety*, 1 (1), 5-38.
- Räsänen, M. & Summala, H. (1998). Attention and expectation problems in bicycle-car collisions: an in-depth study. *Accident Analysis & Prevention*, 30 (5), 657-666.
- Rauch, A., Klanner, F., Rasshofer, R. & Dietmayer, K. (2012). *Car2x-based perception in a high-level fusion architecture for cooperative perception systems*, Paper presented at the IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Alcalá de Henares, Spain.
- Reuss, H., Kiesel, A., Kunde, W. & Wühr, P. (2012). A cue from the unconscious—masked symbols prompt spatial anticipation. *Frontiers in psychology*, 3, 1-10.
- Rhede, J. G., Wäller, C. & Oel, P. (2011). Der FAS Warnbaukasten – Strategie für die systematische Entwicklung und Ausgabe von HMI-Warnungen. In VDI Wissensforum (Ed.), 6. *VDI-Tagung - Der Fahrer im 21. Jahrhundert Fahrer, Fahrerunterstützung und Bedienbarkeit (VDI-Berichte 2134)* (pp. 63-75). Düsseldorf: VDI Verlag GmbH.

- Rudin-Brown, C. M. & Parker, H. A. (2004). Behavioural adaptation to adaptive cruise control (ACC): implications for preventive strategies. *Transportation Research Part F*, 7 (2), 59-76.
- Rumar, K. (1990). The basic driver error: late detection. *Ergonomics*, 33, 1281-1290.
- Schall, M. C., Rusch, M. L., Lee, J. D., Dawson, J. D., Thomas, G., Aksan, N. & Rizzo, M. (2013). Augmented Reality Cues and Elderly Driver Hazard Perception. *Human Factors*, 55 (3), 643-658.
- Schiff, W. & Detwiler, M. L. (1979). Information used in judging impending collision. *Perception*, 8 (6), 647-658.
- Schmidt, G. & Krüger, H.-P. (2010). *Violating the driver's threat anticipation and the effect of different modalities for Forward Collision Warnings (FCW)*. Paper presented at the HFES Europe Chapter Conference, Berlin, Germany.
- Schmidt, R. A., Gielen, S. C. & Van Den Heuvel, P. J. (1984). The locus of intersensory facilitation of reaction time. *Acta Psychologica*, 57 (2), 145-164.
- Schweitzer, N., Apter, Y., Ben-David, G., Liebermann, D. G. & Parush, A. (1995). A field study on braking responses during driving, II. Minimum driver braking times. *Ergonomics*, 38, 1903 -1910.
- Schöttl, D. (2014). *Evaluation frühzeitiger Fahrerinformationen – Blick- und Bremsverhalten bei fehlerhafter Richtungsanzeige*. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Universität Würzburg.
- Scott, J. J. & Gray, R. (2008). A Comparison of Tactile, Visual, and Auditory Warnings for Rear-End Collision Prevention in Simulated Driving. *Human Factors*, 50 (2), 264-275.
- Seeliger, F., Weidl, G., Petrich, D., Naujoks, F., Breuel, G., Neukum, A. & Dietmayer, K. (2014). Advisory warnings based on cooperative perception. In Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE (Ed.), *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium* (pp. 246-252). Dearborn: IEEE.
- Senders, J. W., Kristofferson, A., Levison, W., Dietrich, C. & Ward, J. (1967). The attentional demand of automobile driving. *Highway Research Record*, 195, 15-33.
- Sorkin, R. D. (1988). Why are people turning off our alarms? *Journal of the Acoustic Society of America*, 84 (3), 1107-1108.
- Sorkin, R. D., Kantowitz, B. H. & Kantowitz, S. C. (1988). Likelihood alarm displays. *Human Factors*, 30, 445-459.
- Spence, C. & Ho, C. (2008). Multisensory warning signals for event perception and safe driving. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 9 (6), 523-554.
- St. John, M. & Manes, D. I. (2002). Making unreliable automation useful. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 46th Annual Meeting* (pp. 332–336). Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society.
- Statistisches Bundesamt. (2013). *Verkehrsunfälle* (Fachserie 8, Reihe 7). Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.
- Theeuwes, J. & Hagenzieker, P. (1993). Visual search of traffic scenes: On the effect of location expectations. In A. G. Gale (Ed.), *Vision in Vehicles IV* (pp. 149-158). Amsterdam: Elsevier.
- Thoma, S., Lindberg, T. & Klinker, G. (2009). Evaluation of a generic warning for multiple intersection assistance systems. In D. de Waard, H. Godthelp, F. Kooi & K. Brookhuis (Eds.), *Human Factors, Security and Safety* (pp. 1-15). Maastricht: Shaker Publishing.

- Totzke, I., Naujoks, F., Mühlbacher, D. & Krüger, H.-P. (2011a, 19.-21.Oktober). *Precision of congestion warnings: Do drivers really need warnings with precise information about the congestion tails position?* Paper presented at the HFES Europe Chapter Conference, Leeds.
- Totzke, I., Naujoks, F., Mühlbacher, D. & Krüger, H.-P. (2011b). Stauendewarnungen im Fahrzeug: Eine (un)geeignete Unterstützung für ältere Fahrer? In M. E. S. Schmid, J. A. Adenauer & A. Lichtenstein (Eds.), *Reflexionen und Visionen der Mensch-Maschine-Interaktion - Aus der Vergangenheit lernen, Zukunft gestalten. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 22* (pp. 12-13). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Totzke, I., Naujoks, F., Mühlbacher, D. & Krüger, H.-P. (2012). Precision of congestion warnings: Do drivers really need warnings with precise information about the congestion tail's position? In D. Waard, A. H. Jamson, Y. Barnard & O. M. Y. Carsten (Eds.), *Human Factors of Systems and Technology* (pp. 235 - 248). Maastricht Shaker Publishing.
- Totzke, I. & Volk, M. (2013). Nutzerakzeptanz von Car2X-Technologien: Bewertung von Anwendungsfällen durch die Fahrer im Forschungsprojekt simTD 7. *VDI-Tagung „Der Fahrer im 21. Jahrhundert“ (VDI-Berichte 2205)* (pp. 311–324). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Totzke, I., Volk, M., Naujoks, F. & Krüger, H. P. (2013). *Unzuverlässige Informationen über die Positionierung eines Stauendes: Wie wirken sich falsche Distanzangaben auf das Fahrerverhalten aus?* Paper presented at the AAET – Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel, Braunschweig.
- Treisman, A. M. & Gelade, G. (1980). A feature-integration theory of attention. *Cognitive psychology*, 12 (1), 97-136.
- Underwood, G., Chapman, P., Bowden, K. & Crundall, D. (2002). Visual search while driving: skill and awareness during inspection of the scene. *Transportation Research Part F*, 5 (2), 87-97.
- Vallesi, A. & Shallice, T. (2007). Developmental dissociations of preparation over time: deconstructing the variable foreperiod phenomena. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 33 (6), 1377-1388.
- van der Horst, A. R. A. (1990). *A time-based analysis of road user behaviour in normal and critical encounters*. Dissertation, Technische Universiteit Delft.
- Van der Hulst, M., Meijman, T. F. & Rothengatter, J. A. (1999). Anticipation and the adaptive control of safety margins in driving. *Ergonomics*, 42, 336–345.
- Van Erp, J. B. F. & Van Veen, H. A. H. C. (2004). Vibrotactile in-vehicle navigation system. *Transportation Research Part F*, 7, 247–256.
- Venkatesh, V., Morris, M. G., Davis, G. B. & Davis, F. D. (2003). User acceptance of information technology: Toward a unified view. *MIS quarterly*, 425-478.
- Vossel, S., Thiel, C. M. & Fink, G. R. (2006). Cue validity modulates the neural correlates of covert endogenous orienting of attention in parietal and frontal cortex. *Neuroimage*, 32 (3), 1257-1264.
- Wagener, A. & Hoffmann, J. (2010). Behavioural adaptations to redundant frequency distributions in time. In A.C. Norbe & J.T. Coull (Eds.), *Attention and time* (217-226). Oxford: Oxford University Press.
- Wang, D. D., Proctor, R. W. & Pick, D. F. (2003). *Stimulus-response compatibility effects for warning signals and steering responses*. Paper presented at the Second International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design, Park City, Utah.

- Wearden, J. & Lejeune, H. (2008). Scalar properties in human timing: conformity and violations. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 61 (4), 569-587.
- Wege, C., Will, S. & Victor, T. (2013). Eye movement and brake reactions to real world brake-capacity forward collision warnings — A naturalistic driving study. *Accident Analysis & Prevention*, 58, 259-270.
- Weidl, G. & Breuel, G. (2012). *Overall Probabilistic Framework for Modeling and Analysis of Intersection Situations*. Paper presented at the 16th Int. Forum on Advanced Microsystems for Automotive Applications (AMAA 2012), Berlin, Germany.
- Weidl, G., Singhal, V., Petrich, D., Kasper, D., Wedel, A. & Breuel, G. (2014). *Collision risk prediction and warning at road intersections using an object oriented Bayesian network*. Paper presented at the 5th International Conference Automotive-UI13, Eindhoven, The Netherlands.
- Weller, G., Heyne, F., Feige, T., Bretschneider, H., Oeser, H. & Schlag, B. (2014). Die Wirkung gerichteter Warnungen von Fahrerassistenzsystemen auf Blickzuwendungs- und Reaktionszeit von Autofahrern. In E.Brandenburg, L. Doria, A. Gross, T. Günzler & H. Smieszek (Eds.), *Grundlagen und Anwendungen der Mensch-Maschine-Interaktion : 10. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme* (383-390). Berlin: Universitätsverlag der TU Berlin.
- Wentura, D. & Frings, C. (2010). *Kognitive Psychologie*. Wiesbaden: Springer.
- Werneke, J., Kleen, A. & Vollrath, M. (2013). Perfect Timing Urgency, Not Driving Situations, Influence the Best Timing to Activate Warnings. *Human Factors*, 0018720813490728 (online first).
- Werneke, J. & Vollrath, M. (2011, 05.-07.Oktober). *Rechtzeitig warnen - aber wann ist das? Ansätze für Warnstrategien an Kreuzungen*. Paper presented at the 9. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme, Berlin, Germany.
- Werneke, J. & Vollrath, M. (2012). What does the driver look at? The influence of intersection characteristics on attention allocation and driving behavior. *Accident Analysis & Prevention*, 45, 610-619.
- Werneke, J. & Vollrath, M. (2013). How to present collision warnings at intersections? — A comparison of different approaches. *Accident Analysis & Prevention*, 52, 91-99.
- Werneke, J., Wäller, C., Gonter, M., Rhede, J. & Vollrath, M. (2011). Evaluation eines integrierten Warnkonzepts für unterschiedliche Fahrsituationen. In VDI Wissensforum (Ed.), 6. *VDI-Tagung - Der Fahrer im 21. Jahrhundert Fahrer, Fahrerunterstützung und Bedienbarkeit (VDI-Berichte 2134)* (pp. 93-105). Düsseldorf: VDI Verlag GmbH.
- Wickens, C. D. & Alexander, A. L. (2009). Attentional tunneling and task management in synthetic vision displays. *The International Journal of Aviation Psychology*, 19 (2), 182-199.
- Wickens, C. D. & Carswell, C. M. (1995). The proximity compatibility principle: its psychological foundation and relevance to display design. *Human Factors*, 37 (3), 473-494.
- Wickens, C. D. & Dixon, S. R. (2007). The benefits of imperfect diagnostic automation: a synthesis of the literature. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 8 (3), 201-212.
- Wickens, C. D. & McCarley, J. S. (2007). *Applied attention theory*. Taylor & Francis.
- Winner, H. (2009). Frontalkollisionsschutzsysteme. In H. Winner, S. Hakuli & G. Wolf (Eds.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (pp. 522-542). Wiesbaden: Vieweg & Teubner.
- Woodrow, H. (1914). The measurement of attention. *The Psychological Monographs*, 17(5), 1-158.

- Woods, D. D. (1995). The alarm problem and directed attention in dynamic fault management. *Ergonomics*, 38, 2371–2393.
- Yamada, K. & Kuchar, J. K. (2006). Preliminary study of behavioral and safety effects of driver dependence on a warning system in a driving simulator. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A*, 36 (3), 602-610.
- Yan, X., Xue, Q., Ma, L. & Xu, Y. (2014). Driving-simulator-based test on the effectiveness of auditory red-light running vehicle warning system based on time-to-collision sensor. *Sensors*, 14 (2), 3631-3651.
- Yeh, M. & Wickens, C. D. (2001). Display signaling in augmented reality: The effects of cue reliability and image realism on attention allocation and trust calibration. *Human Factors*, 43 (3), 355-365.
- Zarife, R. (2014). *Integrative Warning Concept for Multiple Driver Assistance Systems*. Dissertation, Universität Würzburg.
- Zarife, R., Schmidt, G., Kenntner-Mabiala, R., Metz, B. & Krüger, H.-P. (2012). Wie spezifisch muss eine Warnung sein? – Zur Verwendung von Master Alerts in der multiplen Fahrerassistenz 28. *VDI/VW-Gemeinschaftstagung Fahrerassistenz und Integrierte Sicherheit (VDI-Berichte 2166)* (pp. 375–386). Wolfsburg: VDI Wissenforum GmbH.
- Zhang, Y., Yan, X. & Yang, Z. (2014). Discrimination of Effects between Directional and Nondirectional Information of Auditory Warning on Driving Behavior. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, online first.