

Universität der Bundeswehr München
Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik
Institut für Arbeitswissenschaft

Nutzergerechte Auslegung von Ausweichassistenz

Markus Sieber

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik der Universität der Bundeswehr München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. rer. nat. habil. Hans-Joachim Gudladt
1. Berichterstatter: Univ.-Prof. (i.R.) Dr. phil. rer. soc. habil. Berthold Färber
2. Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Tibor Petzoldt

Die Dissertation wurde am 02.11.2017 bei der Universität der Bundeswehr München eingereicht und durch die Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik am 24.01.2018 angenommen. Die mündliche Prüfung fand am 26.01.2018 statt.

Kurzfassung

Jährlich geschehen auf Deutschlands Straßen mehrere Millionen Verkehrsunfälle. Die Auswirkungen sind teils dramatisch, bis hin zur Todesfolge. Bei der Mehrheit der Unfälle mit Personenschaden ist Fehlverhalten der Fahrer eine Unfallursache. Fahrerassistenzsysteme (FAS) sind dazu geeignet, menschliche Schwächen bei der Fahrzeugführung zu kompensieren. Zur Vermeidung von Unfällen mit Personenschaden eignen sich vor allem Antikollisionssysteme: FAS, die einen Fahrzeugführer dabei unterstützen, einen drohenden Zusammenstoß abzuwenden.

Dabei stehen zur Kollisionsvermeidung grundsätzlich zwei Strategien zur Verfügung: Brems- und Ausweichmanöver. Während FAS die Bremsmanöver unterstützen sehr verbreitet sind, gilt dies nicht für Ausweichassistenz. Sie stellt nicht nur höhere Anforderungen an die maschinelle Wahrnehmung und Informationsverarbeitung, sondern auch an die Mensch-Maschine-Schnittstelle. Es liegen bisher kaum Erkenntnisse dazu vor, wie diese nutzergerecht gestaltet werden kann. Dabei hängt die Gebrauchstauglichkeit (und damit auch die Effektivität und Effizienz) eines Assistenzsystems maßgeblich von der Qualität der Interaktion zwischen Fahrer und System ab.

In dieser Arbeit wurden zunächst der Unterstützungsbedarf von Fahrern in Ausweichsituationen ermittelt und die relevanten Eigenschaften des Nutzers und des Nutzungskontexts einer Ausweichassistenz analysiert. Anschließend wurden verschiedene Konzepte für Ausweichassistenz erarbeitet, um diesen Bedarf zu decken: die Ausweichunterstützung, die Ausweichempfehlung und die Ausweichautomatik. Für jedes dieser Konzepte wurde eine konkrete Schnittstellengestaltung vorgeschlagen und diese in einer Probandenstudie hinsichtlich ihrer Gebrauchstauglichkeit evaluiert. Dazu wurden auf einer Teststrecke Fahrstudien als Realfahrten mit Hindernisattrappen und Fahrten mit einem vehicle in the loop (VIL)-Fahr Simulator durchgeführt: In mehreren Vorstudien und vier Experimenten (eines zur Ausweichunterstützung, eines zur Ausweichempfehlung, eines zur Ausweichautomatik und eines zu weiteren Einflussfaktoren auf Fahrererleben und -verhalten) wurden dabei Daten zur Wirksamkeit und Kontrollierbarkeit unterschiedlicher Aktorenkombinationen und -parametrierungen gesammelt.

Auf Grundlage der daraus gewonnenen Erkenntnisse wurden Gestaltungsempfehlungen für eine nutzergerechte Ausweichunterstützung, Ausweichempfehlung und Ausweichautomatik erarbeitet, die dem Entwickler einer Ausweichassistenz als Leitfaden dienen können.

Abstract

Several millions of traffic accidents occur on Germany's roads every year. The consequences are often dire and regularly include the loss of human life. Human error is among the leading causes of road traffic accidents that result in physical injury. Advanced driver assistance systems (ADAS) provide a means to compensate for a driver's shortcomings in vehicular guidance. ADAS for collision avoidance that aid drivers in preventing an impending crash are particularly suitable for the reduction the number of accidents.

There are two basic strategies in collision avoidance: braking maneuvers and steering maneuvers. While braking assistance ADAS are prevalent in modern vehicles, the same does not apply to swerving assistance, which demands higher standards and better performance not only concerning machine vision and information processing but also on the human-machine interface. To date, there are only few insights regarding its user friendly design, despite the fact that usability (and therefore also the effectivity and efficiency) of an ADAS largely depends on the quality of the interaction between system and driver.

The work presented here begins by identifying the assistance required by drivers in emergency steering situations and by analyzing relevant properties of the user and the context of use of a swerving ADAS. Different concepts for a swerving ADAS are sketched out to cover the demands identified: steering assistance, steering recommendation and automatic emergency steering. A specific interface design is then devised and implemented for each of these concepts, before their usability is evaluated in user studies. To achieve this aim, driving experiments are conducted on a test track using dummy obstacles as well as a vehicle in the loop (VIL) driving simulator: throughout several preliminary studies and four experiments (one on steering assistance, one on steering recommendations, one on automatic emergency steering, and one on other factors influencing driver perception and behavior) data on the efficacy and controllability of different actuator combinations and parametrizations are collected.

Based on the findings from these experiments, design recommendations for usable steering assistance, usable steering recommendation, and usable automatic emergency steering are compiled and provided as a guideline in swerving ADAS development.

Danksagung

Diese Dissertation ist Ergebnis meiner mehrjährigen Tätigkeit am Institut für Arbeitswissenschaft der Universität der Bundeswehr München. Zu ihrem Entstehen haben zahlreiche Menschen einen Beitrag geleistet, für den ich meinen herzlichen Dank aussprechen möchte.

An erster Stelle danke ich meinem Doktorvater und langjährigen Vorgesetzten, Prof. Dr. Berthold Färber, der diese Arbeit ermöglichte und mich dabei in jeder Hinsicht unterstützte. Dabei bedanke ich mich ganz besonders für das in mich gesetzte Vertrauen.

Mein Dank gilt auch Prof. Dr. Tibor Petzoldt für die Begutachtung der Arbeit sowie Prof. Dr. Hans-Joachim Gudladt für die Übernahme des Vorsitzes des Promotionsausschusses.

Ein Großteil meiner Forschung entstand in Kooperation mit der AUDI AG. Für die Zusammenarbeit möchte ich mich bei allen Beteiligten bedanken. Besonders danke ich dem Team um Dr. Karl-Heinz Siedersberger (AUDI AG) und Andreas Siegel (Audi Electronics Venture) für die Bereitstellung eines Versuchsträgers und das Implementieren der untersuchten Assistenzfunktionen.

Ich danke herzlich meinen gegenwärtigen und ehemaligen, internen und externen Kollegen am Institut für Arbeitswissenschaft für die Zusammenarbeit, die fachlichen Diskussionen, die moralische Unterstützung und die gemeinsame Zeit. Von den vielen Namen, die an dieser Stelle stehen könnten sei wenigstens Prof. Dr. Verena Nitsch genannt, die mir auch als Vorgesetzte große Freiheiten zur Fertigstellung dieser Arbeit einräumte.

Ich danke zudem den Studenten, die durch ihre Mitarbeit bei der Durchführung der Fahrstudien halfen und allen Probanden, die an diesen Studien teilgenommen und ihre Daten zur Verfügung gestellt haben.

Nicht zuletzt danke ich allen Freunden, Unterstützern und sonstigen Wegbegleitern – allen voran meiner Familie – die dazu beigetragen haben, mich zu dieser Arbeit zu befähigen. Größter Dank gilt dabei meiner Ehefrau Katrin, vor allem für ihre Geduld, ihr Verständnis und ihre Fürsorge in den Wochen des Schreibens.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XIII
Tabellenverzeichnis.....	XIX
Abkürzungsverzeichnis	XXIII
1. Einleitung	1
1.1. Ausgangslage.....	1
1.2. Fahrerassistenzsysteme.....	3
1.2.1. Klassifizierung.....	3
1.2.2. FAS zur Kollisionsvermeidung.....	6
1.2.3. Ausweichassistenz als ungenutzte Chance.....	7
1.3. Zielsetzung.....	9
2. Theoretischer Hintergrund	11
2.1. Begriffsklärung.....	11
2.2. Grundlagen der nutzergerechten Gestaltung	11
2.2.1. Gebrauchstauglichkeit eines soziotechnischen Systems	11
2.2.2. Herstellung und Prüfung von Gebrauchstauglichkeit	12
2.3. Aspekte menschlicher Wahrnehmung.....	13
2.3.1. Sehsinn.....	13
2.3.2. Hörsinn	14
2.3.3. Vestibulärsinn	15
2.3.4. Somatosensorik.....	15
2.3.5. Multimodale Reizintegration.....	16
2.3.6. Kritikalitätswahrnehmung.....	16
2.4. Aspekte menschlichen Verhaltens	17

2.4.1.	Unaufmerksamkeit.....	17
2.4.2.	Überraschung.....	17
2.4.3.	Kollisionsvermeidungsverhalten.....	17
2.4.4.	Relevante Schutzreflexe.....	19
2.4.5.	Reaktion auf Brems- und Lenkeingriffe.....	20
2.5.	Verfügbare Aktorik.....	20
2.5.1.	Cockpitanzeigen.....	20
2.5.2.	Lautsprecheranlage.....	21
2.5.3.	Lenksystem.....	21
2.5.4.	Bremssystem.....	22
2.5.5.	Andere Aktorik.....	22
2.6.	Optimierungskriterien: Wirksamkeit und Kontrollierbarkeit.....	23
2.6.1.	Wirksamkeit.....	23
2.6.2.	Akzeptanz als moderierender Faktor.....	23
2.6.3.	Kontrollierbarkeit.....	24
2.6.4.	Bisherige Vorgaben.....	24
2.6.5.	Gewählte Kriterien.....	25
2.7.	Aspekte der Untersuchungsmethodik.....	25
2.7.1.	Durchführbarkeit.....	25
2.7.2.	Verhaltensvalidität.....	26
2.7.3.	Gewählte Methoden.....	27
3.	Fragestellung.....	29
4.	Konzepte für Ausweichassistenz.....	31
4.1.	Abgeleiteter Unterstützungsbedarf der Fahrer.....	31
4.2.	Ausweichunterstützung.....	32
4.3.	Ausweichempfehlung.....	34
4.4.	Ausweichautomatik.....	36

5.	Versuchsübergreifende Methodik	39
5.1.	VIL-Fahrsimulator	39
5.2.	CAPLOS	40
5.3.	Coverstorys	42
5.4.	Versuchsfahrzeuge, Messtechnik, Versuchsgelände.....	42
6.	Experiment 1 – Ausweichunterstützung	45
6.1.	Hintergrund und Fragestellung	45
6.2.	Vorstudien.....	45
6.3.	Stichprobe.....	46
6.4.	Methodik.....	46
6.4.1.	Messaufbau	46
6.4.2.	Systemgestaltung	47
6.4.3.	Versuchsszenarien und -strecken.....	48
6.4.4.	Versuchsdesign	50
6.4.5.	Versuchsablauf.....	53
6.5.	Ergebnisse	54
6.5.1.	Teilexperiment 1a – Verhalten uninstruierter Fahrer.....	54
6.5.2.	Teilexperiment 1b – Lenkhilfestärke, Testumgebung.....	54
6.5.3.	Teilexperiment 1c – Hilfsmomentverlauf	60
6.5.4.	Teilexperiment 1d – Falschauslösung	67
6.6.	Diskussion	69
7.	Experiment 2 - Ausweichempfehlung	75
7.1.	Hintergrund	75
7.2.	Vorstudie	75
7.3.	Stichprobe.....	77
7.4.	Methodik.....	77
7.4.1.	Messaufbau	77

7.4.2.	Systembeschreibung.....	77
7.4.3.	Versuchsszenarien, -strecke und -material.....	78
7.4.4.	Versuchsdesign.....	80
7.4.5.	Versuchsablauf.....	82
7.5.	Ergebnisse.....	83
7.5.1.	Teilexperiment 2a – berechtigte Auslösung.....	83
7.5.2.	Teilexperiment 2b – unberechtigte Auslösung.....	89
7.6.	Diskussion.....	91
8.	Experiment 3 – Automatisches Ausweichen.....	95
8.1.	Hintergrund.....	95
8.2.	Vorstudie.....	95
8.3.	Stichprobe.....	96
8.4.	Methodik.....	97
8.4.1.	Messaufbau.....	97
8.4.2.	Systembeschreibung.....	97
8.4.3.	Versuchsszenarien, -strecke und -material.....	98
8.4.4.	Versuchsdesign.....	100
8.4.5.	Versuchsablauf.....	103
8.5.	Ergebnisse.....	103
8.5.1.	Teilexperiment 3a – Nutzenfall.....	103
8.5.2.	Teilexperiment 3b – Falschauslösung.....	111
8.6.	Diskussion.....	114
9.	Experiment 4 – Weitere Einflüsse.....	119
9.1.	Hintergrund.....	119
9.2.	Stichprobe.....	120
9.3.	Methodik.....	120
9.3.1.	Messaufbau.....	120

9.3.2.	Versuchsstrecke und -material	120
9.3.3.	Versuchsablauf.....	120
9.3.4.	Versuchsdesign	121
9.4.	Ergebnisse	123
9.4.1.	Subjektive Messdaten	123
9.4.2.	Objektive Messdaten	128
9.5.	Diskussion	133
10.	Gestaltungsempfehlungen	137
10.1.	Ausweichunterstützung.....	137
10.2.	Ausweichempfehlung.....	139
10.3.	Ausweichautomatik	143
11.	Ausblick und weiterer Forschungsbedarf	145
12.	Zusammenfassung	149
13.	Literaturverzeichnis.....	155
Anhang	169

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verkehrsentwicklung in Deutschland, © Statistisches Bundesamt (Destatis), 2017.....	1
Abbildung 2: Beispiele für Maßnahmen zur Erhöhung von Verkehrssicherheit.....	2
Abbildung 3: Einteilung von Fahrerassistenzsystemen (Gasser et al., 2015)	4
Abbildung 4: Wirkschema einer umfassenden Bremsassistentz	6
Abbildung 5: Benötigte Distanzen zur Kollisionsvermeidung – Ausweichen versus Bremsen	8
Abbildung 6: Wirkschema einer umfassenden Ausweichassistentz.....	32
Abbildung 7: Funktionsprinzip des VIL (entnommen aus Rüger, 2015, S. 40).....	40
Abbildung 8: CAPLOS im Einsatz.....	41
Abbildung 9: Versuchsgelände der UniBw München (© 2017 Google, nachträglich bearbeitet).....	43
Abbildung 10: Aus- (links) und Einlenkvorgang (rechts) beim Ausweichen.....	45
Abbildung 11: Versuchsanordnung (Vorstudie Ausweichunterstützung).....	46
Abbildung 12: Zeitparameter der Lenkunterstützung in Experiment 1	48
Abbildung 13: Szenario "Folgefahrt" (Experiment 1)	48
Abbildung 14: Szenario "Querverkehr" (Experiment 1)	49
Abbildung 15: Szenario "Kurvenfahrt" (Experiment 1)	49
Abbildung 16: Typischer Lenkmomentverlauf eines Fahrers beim Ausweichen mit Entlastung durch Hilfsmomente der Ausweichunterstützung	55
Abbildung 17: Mittleres betragliches Lenkmoment des Fahrers beim Ausweichvorgang mit Ausweichunterstützung	55
Abbildung 18: Maximaler Lenkradwinkel nach links beim Ausweichvorgang mit Ausweichunterstützung	56
Abbildung 19: Maximale Lenkradwinkelgeschwindigkeit nach links beim Ausweichvorgang mit Ausweichunterstützung	56
Abbildung 20: Maximale Gierrate nach links beim Ausweichvorgang mit Ausweichunterstützung	57
Abbildung 21: Maximaler Querversatz zur Ausgangsposition nach links beim Ausweichvorgang mit Ausweichunterstützung.....	57

Abbildung 22: Durchschnittlicher Lenkmomentverlauf für Hilfsmomentstärke 1 (links) und 2 (rechts) beim Ausweichen mit Ausweichunterstützung.....	59
Abbildung 23: Relative Häufigkeit vermiedener Kollisionen beim Ausweichen mit Ausweichunterstützung.....	61
Abbildung 24: Relative Häufigkeit des Verlassens der Fahrbahn beim Ausweichen mit Ausweichunterstützung.....	61
Abbildung 25: Relative Häufigkeit erwünschter Manöver (ohne Kollision oder Verlassen der Fahrbahn) beim Ausweichen mit Ausweichunterstützung.....	62
Abbildung 26: Maximaler Lenkradwinkel nach links beim Ausweichvorgang mit Ausweichunterstützung.....	62
Abbildung 27: Maximale Lenkradwinkelgeschwindigkeit nach links beim Ausweichen mit Ausweichunterstützung.....	63
Abbildung 28: Mittlere betragliche Abweichung von der Idealtrajektorie beim Ausweichen mit Ausweichunterstützung.....	63
Abbildung 29: Relative Häufigkeit von Gegenmomenten beim Ausweichen mit Ausweichunterstützung.....	64
Abbildung 30: Lenkradwinkelverlauf bei Falschauslösung einer Ausweichunterstützung – repräsentativer Fall.....	68
Abbildung 31: Lenkradwinkelverlauf bei Falschauslösung einer Ausweichunterstützung – subjektiv am gefährlichsten bewerteter Fall.....	69
Abbildung 32: Lenkradwinkelverlauf bei Falschauslösung einer Ausweichunterstützung – objektiv gefährlichster Fall.....	69
Abbildung 33: Durchschnittlicher Lenkradwinkelverlauf für Hilfsmomentstärke MS2 (links) und MS1 (rechts) bei Ausweichunterstützung.....	70
Abbildung 34: Durchschnittlicher Handlenkmomentverlauf beim Ausweichen mit Ausweichunterstützung.....	72
Abbildung 35: Anzeige "Ausweichpfeil" (schwarze Bildanteile entfallen im HUD).....	77
Abbildung 36: CAPLOS ein- (links) und ausgefahren (rechts) bei Experiment 2a.....	78
Abbildung 37: Versuchsanordnung, Szenario „berechtigte Auslösung mit viel Manövrierraum“.....	79
Abbildung 38: Versuchsanordnung, Szenario „berechtigte Auslösung mit wenig Manövrierraum“.....	79

Abbildung 39: Verteilung der Probandenurteile zur Bewertung der Fahrsituation bei plötzlich auftretendem Hindernis	84
Abbildung 40: Maximaler Lenkradwinkel beim Ausweichen mit freiem (links) und belegtem Gegenfahrstreifen (rechts).....	86
Abbildung 41: Maximaler nach links hergestellter Querversatz beim Ausweichen mit freiem (links) und belegtem Gegenfahrstreifen (rechts)	87
Abbildung 42: Laterale Distanz zum Hindernis beim Passieren beim Ausweichen mit freiem (links) und belegtem Gegenfahrstreifen (rechts)	87
Abbildung 43: Maximale Querbeschleunigung beim Ausweichen mit freiem (links) und belegtem Gegenfahrstreifen (rechts).....	88
Abbildung 44: Maximale Längsverzögerung beim Ausweichen mit freiem (links) und belegtem Gegenfahrstreifen (rechts).....	89
Abbildung 45: Probandenurteile zur Bewertung der Falschauslösung einer Ausweichempfehlung auf der SBS	89
Abbildung 46: Maximaler hergestellter Querversatz bei Falschauslösung der Ausweichempfehlungen.....	90
Abbildung 47: Maximale Längsverzögerung bei Falschauslösung der Ausweichempfehlungen	91
Abbildung 48: CAPLOS im ein- (links) und ausgefahrenen (rechts) Zustand bei einem Fahrversuch zur Ausweichautomatik (Experiment 3).....	98
Abbildung 49: Nebenaufgabe - Lesen klein bedruckter Schilder am linken Fahrbahnrand.....	99
Abbildung 50: Szenario "berechtigte Auslösung" (Experiment 3a)	99
Abbildung 51: Szenario "unberechtigte Auslösung" (Experiment 3b)	100
Abbildung 52: Histogramm der Ausgangsqueraufgabe zur Fahrstreifenmitte im Szenario "berechtigte Auslösung" (Experiment 3a).....	104
Abbildung 53: Maximal hergestellter Querversatz beim Ausweichen	104
Abbildung 54: Lateraler Abstand zum Hindernis beim Passieren beim Ausweichen.....	105
Abbildung 55: Relative Häufigkeit des Herstellens von 0,5 m lateralen Sicherheitsabstands zum Hindernis beim Ausweichen.....	105
Abbildung 56: Längsabstand beim Herstellen eines seitlichen Sicherheitsabstandes von 0,5 m zum Hindernis beim Ausweichen.....	106

Abbildung 57: TTC beim Herstellen eines lateralen Sicherheitsabstandes von 0,5 m zum Hindernis beim Ausweichen.....	106
Abbildung 58: Mittlere betragliche Abweichung von der Idealtrajektorie beim Ausweichen.....	107
Abbildung 59: Maximale Querschleunigung beim Ausweichen.....	108
Abbildung 60: Maximale Längsverzögerung beim Ausweichen.....	108
Abbildung 61: Probandenurteile zur Bewertung der Falschauslösung einer Ausweichautomatik auf der SBS.....	111
Abbildung 62: Maximal hergestellter Querversatz bei Falschauslösung der Ausweichautomatiken.....	112
Abbildung 63: Fahrverlauf eines Probanden mit Ausweichautomatik A bei Falschauslösung mit Eindringen in den Gegenfahrstreifen – kontrollierter Fall.....	113
Abbildung 64: Fahrverlauf eines Probanden mit Ausweichautomatik A bei Falschauslösung mit Eindringen in den Gegenfahrstreifen – gefährlicher Fall.....	113
Abbildung 65: Maximale Längsverzögerung bei Falschauslösung der Ausweichautomatiken.....	114
Abbildung 66: Versuchsanordnung (Experiment 4).....	121
Abbildung 67: SBFV-Urteile der Probanden bei spätem (TTC 1,4 s) und frühem (1,8 s), sowie bei langsamem (Druck 5 bar) und schnellem (Druck 8 bar) Hindernis.....	123
Abbildung 68: Ausmaß der empfundenen Überraschung bei spätem (TTC 1,4 s) und frühem (1,8 s), sowie bei langsamem (Druck 5 bar) und schnellem (Druck 8 bar) Hindernis.....	124
Abbildung 69: Ausmaß des empfundenen Erschreckens bei spätem (TTC 1,4 s) und frühem (1,8 s), sowie bei langsamem (Druck 5 bar) und schnellem (Druck 8 bar) Hindernis.....	125
Abbildung 70: Ausmaß der empfundenen Angst bei spätem (TTC 1,4 s) und frühem (1,8 s), sowie bei langsamem (Druck 5 bar) und schnellem (Druck 8 bar) Hindernis.....	125
Abbildung 71: Ausmaß der empfundenen erweckten Handlungsbereitschaft bei spätem (TTC 1,4 s) und frühem (1,8 s), sowie bei langsamem (Druck 5 bar) und schnellem (Druck 8 bar) Hindernis.....	126
Abbildung 72: Ausmaß der empfundenen notwendigen Reaktionsstärke bei spätem (TTC 1,4 s) und frühem (1,8 s), sowie bei langsamem (Druck 5 bar) und schnellem (Druck 8 bar) Hindernis.....	127
Abbildung 73: Ausmaß der empfundenen Sicherheitskritikalität bei spätem (TTC 1,4 s) und frühem (1,8 s), sowie bei langsamem (Druck 5 bar) und schnellem (Druck 8 bar) Hindernis.....	127

Abbildung 74: Geschätzte Unfallwahrscheinlichkeit bei spätem (TTC 1,4 s) und frühem (1,8 s), sowie bei langsamem (Druck 5 bar) und schnellem (Druck 8 bar) Hindernis.....	128
Abbildung 75: Reaktionszeiten von Hindernisanforderung bis zu erster Brems- oder Lenkreaktion.....	130
Abbildung 76: Maximale Längsverzögerung.....	130
Abbildung 77: Maximaler Lenkradwinkel.....	131
Abbildung 78: Seitlicher Abstand zum Hindernis beim Passieren.....	131

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Lenkhäufigkeiten in ausgewählten Probandenstudien zur Kollisionsvermeidung.....	18
Tabelle 2: Unterstützungsmöglichkeiten durch Fahrerassistenz zur Kompensation potentieller Fahrerschwächen beim Notausweichen.....	31
Tabelle 3: Parametrierung der Lenkhilfen in Experiment 1, Δt in ms	48
Tabelle 4: Abhängige Variablen (AV) in Telexperiment 1a	50
Tabelle 5: Unabhängige Variablen (UV) in Experiment 1b.....	50
Tabelle 6: Abhängige Variablen (AV) in Telexperiment 1b	51
Tabelle 7: Unabhängige Variablen (UV) in Telexperiment 1c	51
Tabelle 8: Abhängige Variablen (AV) in Telexperiment 1c	52
Tabelle 9: Unabhängige Variablen (UV) in Telexperiment 1d.....	53
Tabelle 10: Abhängige Variablen (AV) in Telexperiment 1d.....	53
Tabelle 11: Fahrerurteile zur Äquivalenz des Szenarios „Querverkehr“ bei Realfahrt und der Fahrt mit dem VIL-Fahrsimulator.....	58
Tabelle 12: Durchschnittliche Symptome von Simulatorkrankheit am Ende von Experiment 1	60
Tabelle 13: Probandenurteile zur Bewertung der Ausweichunterstützung bezüglich des Items "hilfreich"	64
Tabelle 14: Probandenurteile zur Bewertung der Ausweichunterstützung bezüglich des Items "nützlich"	65
Tabelle 15: Probandenurteile zur Bewertung der Ausweichunterstützung bezüglich des Items "deutlich spürbar"	65
Tabelle 16: Probandenurteile zur Bewertung der Ausweichunterstützung bezüglich des Items "leicht übersteuerbar"	65
Tabelle 17: Probandenurteile zur Bewertung der Ausweichunterstützung bezüglich des Items "befreiend"	65
Tabelle 18: Probandenurteile zur Bewertung der Ausweichunterstützung bezüglich des Items "entlastend".....	66

Tabelle 19: Probandenurteile zur Bewertung der Ausweichunterstützung bezüglich des Items "unterstützend"	66
Tabelle 20: Probandenurteile zur Bewertung der Ausweichunterstützung bezüglich des Items "erhöht Sicherheit"	66
Tabelle 21: Probandenurteile zur Bewertung der Falschauslösung einer Ausweichunterstützung auf der SBS (nach Neukum & Krüger, 2003)	67
Tabelle 22: Unabhängige Variablen (UV) im Telexperiment 2a	80
Tabelle 23: Abhängige Variablen (AV) im Telexperiment 2a	81
Tabelle 24: Unabhängige Variablen (UV) in Telexperiment 2b	82
Tabelle 25: Abhängige Variablen (AV) in Telexperiment 2b	82
Tabelle 26: Fahrerurteile zur Angemessenheit des Eingriffszeitpunkts der Ausweichempfehlung bei Erstkontakt	83
Tabelle 27: Relative Häufigkeit des Bemerkens der Anzeige und des Lenkeingriffs einer Ausweichempfehlung bei Erstkontakt	84
Tabelle 28: Relative Häufigkeit der Interpretationen der Anzeige bei Erstkontakt	85
Tabelle 29: Relative Häufigkeit der Interpretationen des Lenkeingriffs bei Erstkontakt	85
Tabelle 30: Absolute (und relative) Häufigkeiten von Primärkollisionen beim Ausweichen mit Ausweichempfehlung	86
Tabelle 31: Relative Häufigkeiten der Fahrerurteile zur Akzeptanz der Ausweichempfehlungen trotz erlebter Falschauslösung	90
Tabelle 32: Unabhängige Variablen (UV) im Telexperiment 3a	100
Tabelle 33: Abhängige Variablen (AV) im Telexperiment 3a	101
Tabelle 34: Unabhängige Variablen (UV) im Telexperiment 3b	102
Tabelle 35: Abhängige Variablen (AV) im Telexperiment 3b	102
Tabelle 37: Fahrerurteile zur Angemessenheit des Eingriffszeitpunkts der Ausweichassistenz	109
Tabelle 36: Relative Häufigkeiten für das Eindringen in den Gegenfahrstreifen, sowie das Auftreten von ABS- oder ESC-Eingriffen oder starken Bremsungen	109
Tabelle 38: Relative Häufigkeiten für das Bemerkens von Anzeige, Lenkeingriff und Warnton	110
Tabelle 39: Relative Häufigkeiten der Interpretationen der Anzeige	110

Tabelle 40: Relative Häufigkeiten der Interpretationen des Lenkeingriffs.....	110
Tabelle 41: Relative Häufigkeiten der Fahrerurteile zur Akzeptanz des Systemeingriffs.....	111
Tabelle 42: Relative Häufigkeiten der Fahrerurteile zur Akzeptanz des Systemeingriffs nach Falschauslösung	112
Tabelle 43: Unabhängige Variablen (UV) in Experiment 4.....	122
Tabelle 44: Abhängige Variablen (AV) in Experiment 4.....	122
Tabelle 45: Absolute Häufigkeit von Bremsreaktionen.....	128
Tabelle 46: Absolute Häufigkeit von Lenkreaktionen	129
Tabelle 47: Absolute Häufigkeit aller Reaktionsmuster	129

Abkürzungsverzeichnis

ABS	Anti-lock braking system
ACC	Adaptive cruise control
ADAS	Advanced driver assistance system
ANB	Automatische Notbremse
ANOVA	Analysis of variance
ASIL	Automotive safety integrity level
ASR	Antriebsschlupfregelung
AV	Abhängige Variable
AWA	Ausweichautomatik
AWE	Ausweichempfehlung
AWÜ	Ausweichunterstützung
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
CAN	Controller area network
CAPLOS	Compressed air laterally approaching obstacle simulator
EPS	Electric power steering
ESC	Electronic stability control
ETTC	Extended time to collision
FAS	Fahrerassistenzsystem
FEV	Fahrerlaubnisverordnung
GNSS	Global navigation satellite system
GPS	Global positioning system
HUD	Head up display
IfA	Institut für Arbeitswissenschaft
INS	Inertial navigation system
Pkw	Personenkraftwagen
RTCA	Radio technical commission for aeronautics
RTCM	Radio technical commission for maritime services
SBFV	Skala zur Bewertung von Fahr- und Verkehrssituationen
SBS	Störungsbewertungsskala
TCP	Transmission control protocol
TDI	Turbo-charged direct injection
TFSI	Turbo fuel stratified injection
THW	Time headway

TTC	Time to collision
UHF	Ultra high frequency
UniBw	Universität der Bundeswehr
UR:BAN	Urbaner Raum: Benutzergerechte Assistenzsysteme und Netzmanagement
UTC	Universal time coordinated
UV	Unabhängige Variable
VDI	Verein deutscher Ingenieure
VIL	Vehicle in the loop
VTD	Virtual Test Drive
WLAN	Wireless local area network

1. Einleitung

1.1. Ausgangslage

Räumliche Mobilität ist Teil des Fundaments unserer Gesellschaft. Der für die globalisierte Wirtschaft essentielle Güterverkehr nimmt zu (27% seit 2000, siehe Abbildung 1) und erreichte in Deutschland 2015 eine Beförderungsleistung von 665 Milliarden Tonnenkilometer (Statisches Bundesamt, 2016a). Auch der Personenverkehr nimmt zu: Um Lebensbereiche wie Wohnen, Arbeit, Bildung und Freizeit zu verbinden, legte eine Person in Deutschland bereits 2008 jeden Tag durchschnittlich 3,4 Wege mit einer Gesamtstrecke von 39 km zurück (Statistisches Bundesamt, 2013). Jeweils ein Großteil davon – 72 % der Beförderungsleistung im Güterverkehr und 83 % (die Straße nutzende Radfahrer und Fußgänger nicht eingerechnet) im Personenverkehr (Statistisches Bundesamt, 2013) – entfällt auf das Straßennetz.

Der Straßenverkehr erscheint für unsere heutige Lebensweise unverzichtbar. Doch mit wachsendem Verkehrsaufkommen wachsen auch die Nachteile, die er mit sich bringt. Neben ökologischen Problemen wie Lärmbelästigung und schädlichen Emissionen (und deren Folgen), besteht vor allem die Gefahr von Schadensereignissen: Unfälle im Straßenverkehr. 2016 wurden fast 2,6 Millionen Straßenverkehrsunfälle in Deutschland polizeilich erfasst (Statistisches Bundesamt, 2017). Die Folgen sind dramatisch: Mehr als 3.200 Personen fanden dadurch den Tod, fast 400.000 wurden verletzt (Statistisches Bundesamt, 2017). Darüber hinaus entstehen Kosten für Rettungs-, Bergungs- und Polizeieinsätze, für die Reinigung und Reparatur von Schäden an der Infrastruktur, oder durch Zeitverluste in Folge von



Abbildung 1: Verkehrsentwicklung in Deutschland, © Statistisches Bundesamt (Destatis), 2017

Fahrer	Infrastruktur	Fahrzeug
<ul style="list-style-type: none"> • Umfassende Fahrerlaubnis-Ausbildung und -Prüfung • Nachschulungen im Bedarfsfall • Fahrsicherheits-Trainings • Öffentliche Aufklärungskampagnen zu unterschätzten Gefahren im Straßenverkehr • Veränderte Gesetzgebung zum verkehrssicheren Fahrverhalten • Kontrolle und Bestrafung verkehrsunsicheren Fahrerverhaltens • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Einfache Streckenführung • Gute Einsehbarkeit • Kluge Vorfahrtsregelung • Vermeidung von Engstellen und kleinen Kurvenradien • Korrekte Wahl und Wartung des Fahrbahnbelags • Ausreichende Fahrstreifenbreite • Lokal angepasste Höchstgeschwindigkeiten • Deutliche Beschilderung • Zeitnahe Gefahrenmeldungen • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Passive</i> Sicherheit <ul style="list-style-type: none"> • Energieabsorbierende Stoßfänger und andere dedizierte „Knautschzonen“ • Verformungsresistente Fahrgastzelle • Airbags für die Insassen • ... • <i>Aktive</i> Sicherheit <ul style="list-style-type: none"> • Gute Bereifung und leistungsstarke Bremsanlage • Fahrerassistenzsysteme • ...

Abbildung 2: Beispiele für Maßnahmen zur Erhöhung von Verkehrssicherheit

Staus. Die Bundesanstalt für Straßenwesen bezifferte den durch Straßenverkehrsunfälle verursachten volkswirtschaftlichen Gesamtschaden für das Jahr 2008 auf 31 Milliarden Euro (Baum, Kranz & Westerkamp, 2011).

Angesichts solcher Zahlen erscheint es dringend geboten, die Straßenverkehrssicherheit zu erhöhen. Eine Vielzahl von Maßnahmen ist denkbar, um Straßenverkehrsunfällen und ihren Folgen vorzubeugen. Sie betreffen die Straßenverkehrsteilnehmer, die Infrastruktur oder die Fahrzeuge. Abbildung 2 führt hierzu einige Beispiele an. Dabei werden die das Fahrzeug betreffenden Maßnahmen in solche der passiven und solche der aktiven Sicherheit unterteilt.

Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen dient dazu, Verkehrsunfallfolgen, zum Beispiel den Schweregrad von Verletzungen, zu mindern (Kramer, 1998). Seit der Erfindung des Automobils unternahmen die Hersteller konstruktive Maßnahmen und installierten Systeme in ihren Kraftfahrzeugmodellen, um Fahrzeuginsassen und Unfallgegner im Falle eines Zusammenstoßes möglichst gut zu schützen. Darunter fällt der klassische Sicherheitsgurt (für einen ausgiebigen Überblick über Historie und Wirksamkeitsanalysen siehe Deutscher Verkehrssicherheitsrat, 2011) ebenso, wie Verbundglasscheiben und Ladungssicherungsnetze, bis hin zu automatischen Gurtstraffern oder einem aktiven Anheben der Motorhaube bei Kollision mit Fußgängern und Radfahrern (Daimler AG, 2016). Der Sicherheitsgewinn durch passive Sicherheit gilt als gesichert (Kramer, 2009), auch wenn er nicht genau beziffert werden kann. Das Potenzial passiver Sicherheit im Fahrzeug gilt jedoch als weitgehend ausgeschöpft. Wirksamere Maßnahmen wären häufig unverhältnismäßig aufwendig oder im Widerspruch zu wichtigen konstruktiven Zielen wie dem Leichtbau (Verein Deutscher Ingenieure, 2015). Vor allem aber ist den Elementen der passiven Sicherheit per Definition gemein, dass sie zwar Unfallfolgen abschwächen, das Zustandekommen eines Unfalls aber nicht von vornherein verhindern können.

Abhilfe hierfür können Elemente der aktiven Sicherheit verschaffen. Darunter fällt diejenige Ausstattung eines Fahrzeugs, die Unfälle vermeiden hilft: Eine gute Bereifung und eine leistungsfähige Bremsanlage können ebenso darunter gefasst werden, wie auch eine Scheibenreinigungsanlage oder die gute Lesbarkeit und Verständlichkeit von Cockpitanzeigen. Einen besonderen Stellenwert im Bereich der aktiven Sicherheit aber nehmen elektronische Zusatzeinrichtungen im Fahrzeug ein, die den Fahrer in bestimmten Fahrsituationen unterstützen: die Fahrerassistenzsysteme (FAS). Laut Statistischem Bundesamt (2016b) war im Jahr 2015 bei 88 % der Straßenverkehrsunfälle mit Personenschaden in Deutschland ein Fehlverhalten der Fahrzeugführer Unfallursache. Diese Zahl verdeutlicht das Potenzial zur Unfallvermeidung durch Systeme, die den Fahrer bei seiner Fahraufgabe unterstützen und menschliche Fehler kompensieren. Ein Überblick über das Unfallvermeidungspotenzial von FAS der aktiven Sicherheit findet sich bei Kühn und Hannawald (2015).

1.2. Fahrerassistenzsysteme

1.2.1. Klassifizierung

Der Begriff „Fahrerassistenzsystem“ wird oft unterschiedlich gefasst. Eine Begriffsklärung findet sich zum Beispiel bei Maurer (2009). Auch die Kategorisierung von FAS erfolgt in Abhängigkeit vom jeweiligen Kontext oft auf unterschiedliche Art und Weise: zum Beispiel in aktive (direkt in die Fahrzeugführung eingreifende) oder passive Fahrerassistenz (die nur über den Fahrer wirkt), in Fahrerassistenz- und Fahrerinformationssysteme (z.B. Färber, 2005), solche mit Komfort- und solche mit Sicherheitsfunktion, solche mit oder ohne maschinelle Wahrnehmung (z.B. Maurer, 2009) oder auch danach, auf welcher der drei Ebenen der Fahraufgabe nach Donges (1982) sie wirken. Global betrachtet sind diese Einteilungen häufig unscharf. Ein Navigationsgerät hat beispielsweise primär eine Komfortfunktion. Es erhöht jedoch auch die Fahrsicherheit, wenn ein ortsunkundiger Fahrer keine kognitiven Ressourcen zur Routenfindung und -verfolgung aufwenden muss und dem Verkehrsgeschehen deshalb mehr Aufmerksamkeit widmen kann. Gleichsam wirkt das Navigationsgerät in der Hauptsache auf Navigationsebene. Es fordert aber auch zu konkreten Fahrmanövern (z.B. Fahrstreifenwechsel, Abbiegen) auf und übt damit Einfluss auf Bahnführungsebene aus. Da ein Navigationsgerät weder direkt in die Fahrzeugführung eingreift, noch in kritischen Fahrsituationen unterstützt, wird es vielfach auch überhaupt nicht zu den Fahrerassistenzsystemen gezählt.

Im Rahmen der hier abgedruckten Arbeit werden FAS anhand der Einteilung durch die Bundesanstalt für Straßenwesen (s. Gasser, Seeck & Smith, 2015) klassifiziert. Hierbei wird, wie in Abbildung 3 links zu sehen, zunächst nach der Wirkweise der Systeme unterschieden:

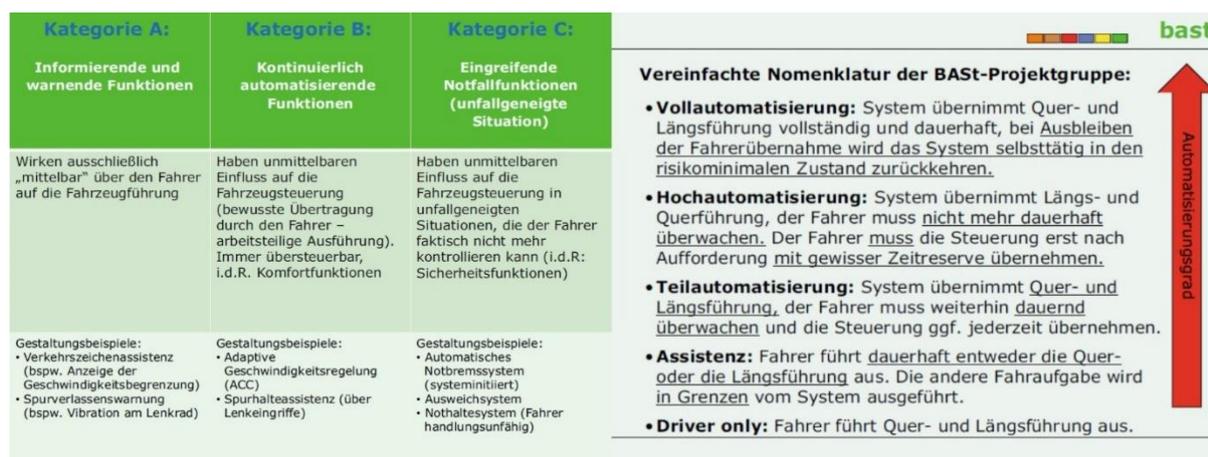


Abbildung 3: Einteilung von Fahrerassistenzsystemen (Gasser et al., 2015)

- Unter Wirkweise A werden informierende oder warnende Fahrerassistenzsysteme gefasst, die nicht direkt, sondern nur über den Fahrer und durch ihn mittelbar, in das Fahrgeschehen eingreifen. In diese Kategorie fallen zum Beispiel ein Spurverlassenswarner oder ein Totwinkelassistent. Systeme in dieser Kategorie werden weiter unterteilt in solche, die eine Statusinformation, solche, die eine abstrakte Warnung, und solche, die eine konkrete Warnung vermitteln.
- Unter Wirkweise B werden kontinuierlich automatisierende Funktionen gefasst, die in einem zweiten Schritt gemäß ihres Automatisierungsgrades weiter untergliedert werden (Abbildung 3, rechts): In die Stufe „Assistenz“ fallen Systeme, die nur entweder Längs- oder Querführung des Fahrzeugs übernehmen, und auch dies nur innerhalb gewisser Grenzen. In diese Kategorie zählen aktuell verbreitete Spurhalteassistenten und abstandsregelnde Tempomaten (adaptive cruise control, ACC). Unter „teilautomatisierten“ Systemen werden solche gefasst, die Längs- und Querführung vollständig übernehmen, vom Fahrer aber dauerhaft überwacht werden müssen. Bei „hochautomatisierten“ Systemen entfällt die dauerhafte Überwachung durch den Fahrer, der nur noch nach Aufforderung und einer gewissen Zeitreserve zur Übernahme der Steuerung bereit sein muss. „Vollautomatisierte“ Systeme, schließlich, können das Fahrzeug bei Ausbleiben einer Fahrerübernahme selbsttätig in einen „risikominimalen Zustand“ überführen.
- Unter der Wirkweise C werden temporär intervenierende Funktionen gefasst: Notfallsysteme, die in „unfallgeneigten“ Situationen in die Fahrzeugführung eingreifen und den primären Regler (z.B. den Fahrer oder ein System der Wirkweise B) vorübergehend überlagern. Einen Vorschlag zur weiteren Untergliederung der Systeme mit Wirkweise C stellte die BAST auf der UR:BAN-Konferenz 2016 vor (Gasser & Auerswald, 2016): Hierbei wird zum einen zwischen den Anwendungsfällen einer „abstrakten Gefahr“ (Ausfall oder Nichterreichbarkeit des primären Reglers, Stufe I) oder einer „konkreten Gefahr“ (unmittelbar bevorstehende Kollision,

Stufe II) unterschieden. Zum anderen wird nach dem Umfang des Eingriffs unterteilt. In Unterkategorie α wird ein fahrerunterstützender Eingriff gefasst. Unterkategorie β fasst fahrereretzende Eingriffe, welche die abstrakte Gefahr durch Überführung in einen „risikominimalen Zustand“ (β_I) oder die konkrete Gefahr durch Auflösung der unmittelbaren wirksamen Bedrohung (β_{II}) bannen, im direkten Anschluss jedoch eine Fahrerübernahme erfordern. In Unterkategorie γ sind Eingriffe angesiedelt, die von Systemen mit umfassender maschineller Wahrnehmung ausgeführt werden können, bei denen auf den fahrereretzenden Eingriff die Übernahme durch den Fahrer entweder funktionsseitig kontrolliert erfolgt, oder eine andere adäquate Steuerungsstrategie ergriffen wird.

Selbst FAS-Laien sind oft das Antiblockiersystem (ABS) und die Fahrdynamikregelung (electronic stability control, ESC) namentlich bekannt. Funktion und Wirkweise beider Systeme werden zum Beispiel bei van Zanten und Kost (2009) beschrieben. Die Wirksamkeit von ABS und ESC zur Unfallvermeidung wurde vielfach untersucht und nachgewiesen (z.B. Chiellino, Winkle, Graab, Ernstberger, Donner & Nerlich, 2010; Gail, Pöppel-Decker, Lorig, Eggers, Lerner & Ellmers, 2008). Die Systeme unterstützen den Fahrer bremsenbasiert und stellen sicher, dass Steuervorgaben, die am Lenkrad gestellt werden, auf der Straße umgesetzt werden. Das ABS verhindert auch bei starker Bremsung ein Blockieren der Räder und die damit verbundene Unfähigkeit zur Kursänderung. Die ESC verhindert durch gezielte Drehzahländerung einzelner Räder unter anderem ein Unter- oder Übersteuern des Fahrzeugs, zum Beispiel auch bei Bremsungen in einer μ -split-Situation (Fahruntergrund mit stark unterschiedlichen Reibwerten). Dabei zählen ABS und ESC jedoch eher zu den „konventionellen FAS“ (Maurer, 2009) und sind von vergleichsweise geringer Komplexität. Zur Umsetzung dieser Funktionen genügen Daten über das eigene Fahrzeug und seinen Zustand (durch Raddrehzahlsensoren, Lenkwinkelsensor, Gierraten- und Beschleunigungssensor). Dabei ist lediglich eine Reaktion auf, keine Interaktion mit, dem Fahrer notwendig.

Ein komplexeres System zur Unfallvermeidung wird dann benötigt, wenn die bloße Umsetzung der Steuervorgaben des Fahrers nicht ausreicht, um einen Zusammenstoß zu verhindern – etwa weil der Fahrzeugführer nicht, zu spät, oder mit falscher Intensität reagiert. Eine Unterstützung des Fahrers in solchen Fällen ist erst mit Kenntnis der Fahrsituation möglich, erfordert also zusätzliche Sensorik zur Wahrnehmung des Fahrzeugumfelds. Moderne Fahrzeuge verwenden z.B. Kameras (vgl. Stiller, Bachmann & Duchow, 2009), Radar (vgl. Winner, 2009), Lidar (vgl. Geduld, 2009) und Ultraschallsensoren (vgl. Noll & Rapps, 2009), um die Position und Bewegung umgebender Objekte zu vermessen. Aufbauend auf den von solcher Sensorik zur Verfügung gestellten Daten können Antikollisionssysteme Eingriffe zur Unfallvermeidung ausführen.

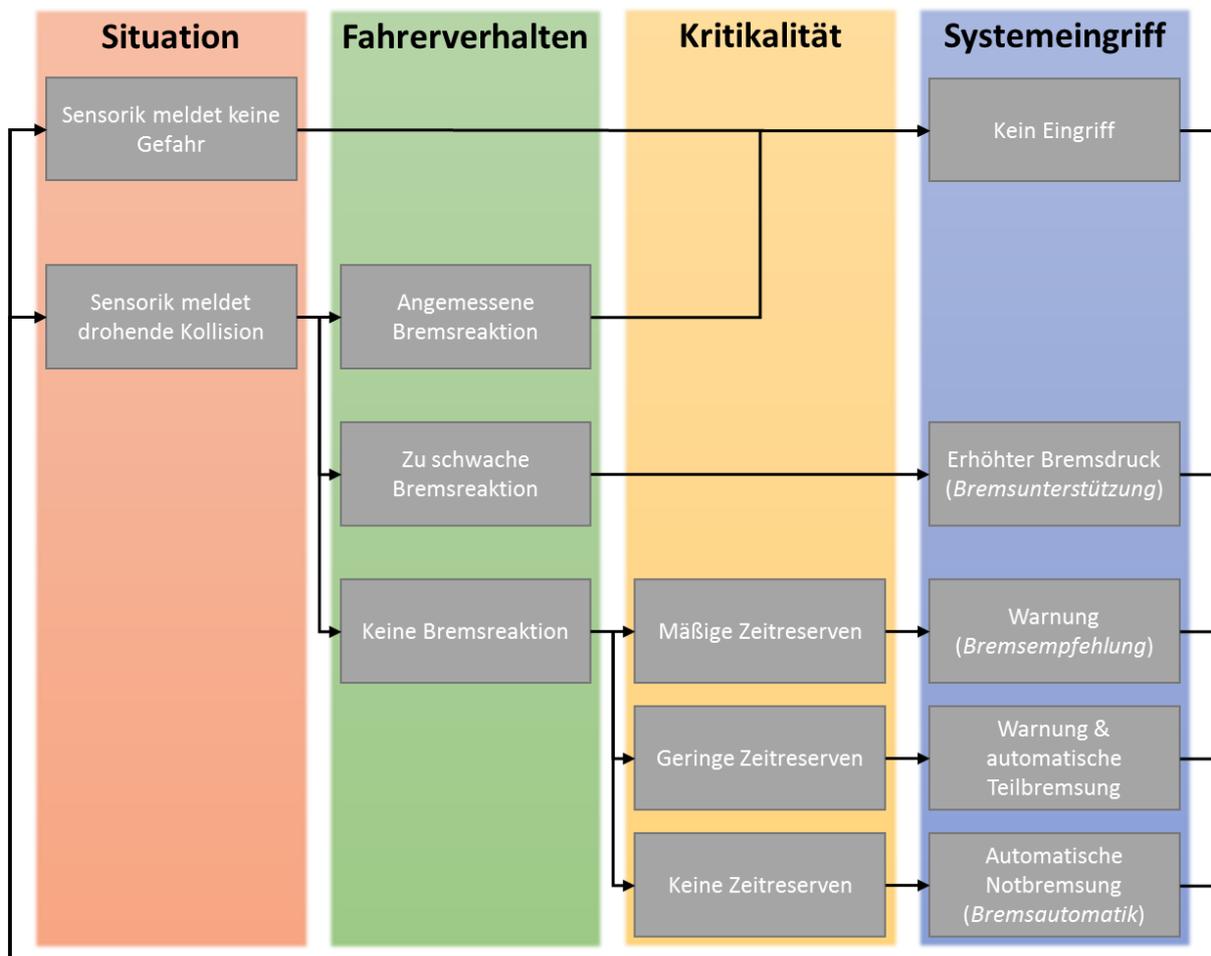


Abbildung 4: Wirkschema einer umfassenden Bremsassistentz

1.2.2. FAS zur Kollisionsvermeidung

Eine allgemeine Abhandlung zu Antikollisionssystemen, also Fahrerassistenz zur Kollisionsvermeidung, findet sich bei Winner (2015). Zu solchen Systemen zählen unter anderem Kollisionswarnungen. Bei diesen handelt es sich in der Regel um dedizierte Funktionen wie eine Warnanzeige in der Windschutzscheibe (z.B. Volvo Car Corporation, 2015). Deutlich weiter gefasst fällt darunter aber bereits die Aufforderung zur Übernahme der Längsführung durch den Fahrer bei schneller Annäherung an ein vorausfahrendes Fahrzeug während einer Fahrt mit aktiviertem ACC. Kollisionswarnungen weisen den Fahrer jedoch nur auf die drohende Gefahr hin und greifen weder in die Fahrzeugführung ein, noch schlagen sie dem Fahrer eine konkrete Lösungsstrategie vor. Solche Hilfestellungen werden häufig im Rahmen von Bremsassistentensystemen gegeben. Diese können bei drohender Kollision über eine oder mehrere von drei grundsätzlichen Strategien eingreifen (vgl. Abbildung 4):

- den Fahrer vor einer Kollision warnen und zur Einleitung eines Bremsmanövers auffordern (Wirkweise A),

- ein vom Fahrzeugführer initiiertes Bremsmanöver verstärken, wenn die Bremsreaktion zu schwach ausfällt, um den Zusammenstoß zu verhindern (Wirkweise C α_{II}), oder
- eigenständig eine Teil- oder Notbremsung initiieren, um die drohende Kollision abzuwenden oder in ihrer Schwere zu reduzieren (Wirkweise C β_{II} oder C γ_{II}).

Bei Winner (2015) werden hierfür jeweils die Begriffe der präventiven Assistenz, der Reaktionsunterstützung und des (automatischen) Notmanövers genannt. Viele Fahrzeughersteller haben bereits Systeme entwickelt und in Serie ausgeliefert, die im Rahmen der Bremsassistenz alle drei genannten Strategien umsetzen. Als Beispiel sei Audi pre sense plus (AUDI AG, 2016) angeführt: Bemerkt das System eine drohende Kollision, setzt es eine Kaskade von Eingriffen in Gang. Unter anderem wird der Hauptbremszylinder vorbefüllt, um dem Fahrer möglichst schnell möglichst viel Bremskraft zur Verfügung zu stellen. Bei einer zu zaghaften Bremspedalbetätigung kann der Bremsdruck soweit erhöht werden, dass ein Aufprall abgewendet wird. Erlauben die Zeitreserven eine Lösung der Situation durch den Fahrer, wird er zunächst durch einen Warnton und eine Anzeige im Kombiinstrument gewarnt. Erfolgt daraufhin keine Reaktion, wird der Fahrer durch einen Bremsruck (Wolkenstein, 2005) auf die Gefahr aufmerksam gemacht. Bei Ablauf der Zeitreserven leitet das System eine Teilbremsung zur Geschwindigkeitsreduktion ein. Wird der Punkt erreicht, an dem die Kollision fahrphysikalisch nicht mehr zu verhindern ist, leitet das System zur Unfallmitigation automatisch eine Bremsung mit Vollverzögerung ein.

1.2.3. Ausweichassistenz als ungenutzte Chance

Die relative Geschwindigkeit zum potenziellen Kollisionspartner auf null zu reduzieren stellt nicht die einzige Möglichkeit zur Kollisionsvermeidung dar. Eine Alternative zum Eingriff in die Fahrzeuglängsführung ist der Eingriff in die Fahrzeugquerführung, mit dem Ziel, das Hindernis zu umfahren: Ein Ausweichmanöver. Welche dieser beiden Kollisionsvermeidungsstrategien in einer gegebenen Situation vorteilhafter ist, hängt von einer Vielzahl von Aspekten ab. Ein Ausweichmanöver hat zum Beispiel häufig eine geringere Beeinträchtigung des nachfolgenden Verkehrs zur Folge und kann damit helfen, Emissionen und das Risiko von Sekundärkollisionen zu reduzieren. Andererseits bietet es größeres Potenzial etwaigen Gegenverkehr zu gefährden. Das wichtigste Argument zur Entscheidung zwischen einem Ausweich- und einem Bremsmanöver liefert jedoch die Fahrphysik: Manchmal kann nur eine der beiden Strategien die Kollision überhaupt noch erfolgreich abwenden.

Der benötigte Bremsweg hängt von der zur Verfügung stehenden Verzögerung (und diese ihrerseits unter anderem von Bereifung und dem Fahruntergrund) sowie der quadrierten abzubauenen Geschwindigkeit (Relativgeschwindigkeit zum Hindernis) ab. Die zum Ausweichen benötigte Distanz ist vom benötigten Querversatz (und dieser seinerseits von der relativen lateralen Position und der Breite

des Hindernisses), der erreichbaren Querbewegung (und diese ihrerseits unter anderem von Breifung und Fahruntergrund), sowie der (einfachen) Relativgeschwindigkeit abhängig. Für den benötigten minimalen Bremsweg d_{brake} und den benötigten minimalen Ausweichweg d_{steer} ergeben sich, unter Vernachlässigung der Reaktionszeit (des Fahrers und der Systeme, z.B. Ansprech- und Schwellzeit), vereinfacht folgende Zusammenhänge (für die konstante Längsverzögerung a_x bzw. Querbewegung a_y , den benötigten Querversatz d_y und die Relativgeschwindigkeit v_{rel}):

$$d_{brake} = \frac{1}{2} * \frac{v_{rel}^2}{a_x} \quad (I)$$

$$d_{steer} = \sqrt{2 * \frac{d_y}{a_y} * v_{rel}} \quad (II)$$

Die minimale Bremsdistanz skaliert also quadratisch, die minimale Ausweichdistanz hingegen linear mit der Geschwindigkeit relativ zum Hindernis. Gegeben ein konkretes Fahrzeug, einen konkreten Fahruntergrund und ein konkretes Hindernis, entstehen beim Abtragen der Relativgeschwindigkeit gegen die Distanz zum Hindernis vier Bereiche, wie in Abbildung 5 schematisch dargestellt: (1) der Bereich niedriger Relativgeschwindigkeit und großer Distanz, in der eine Kollision sowohl durch Ausweichen, als auch durch Bremsen zu verhindern ist, (2) der Bereich hoher Relativgeschwindigkeit und niedriger Distanz, in der eine Kollision weder durch Ausweichen, noch durch Bremsen zu verhindern ist, (3) ein Bereich mit eher niedrigen Relativgeschwindigkeiten, in dem bei bestimmten Distanzen

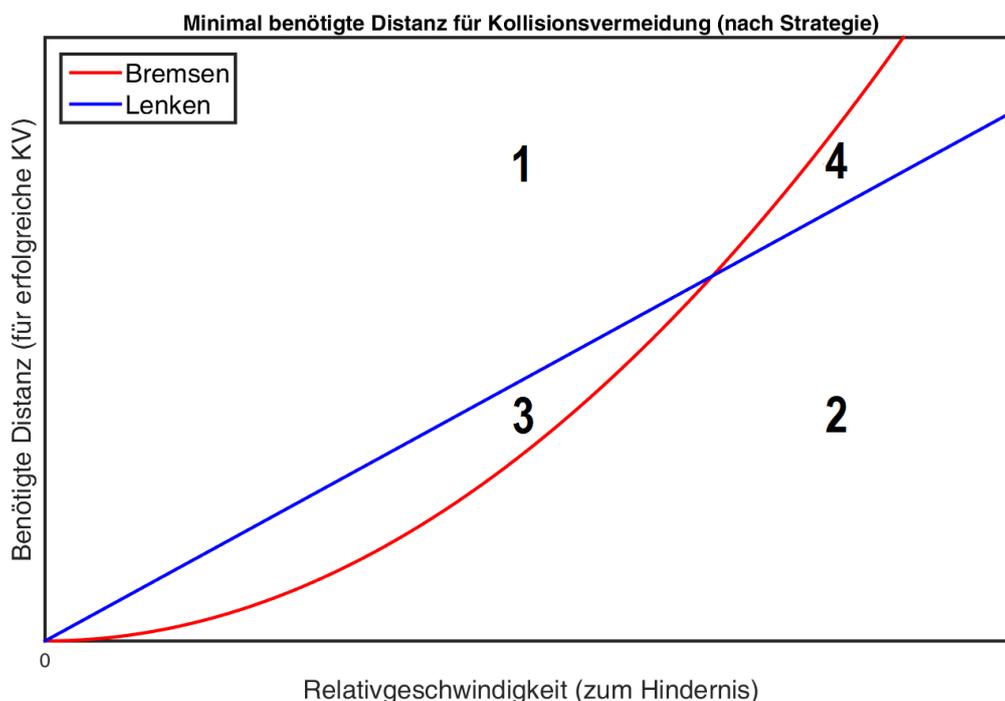


Abbildung 5: Benötigte Distanzen zur Kollisionsvermeidung – Ausweichen versus Bremsen

eine Kollision nicht durch Ausweichen, aber durch Bremsen vermieden werden kann, und (4) ein Bereich mit eher hohen Relativgeschwindigkeiten, in dem bei bestimmten Distanzen eine Kollision nur durch Ausweichen, nicht aber durch Bremsen abgewendet werden kann.

Im Gegensatz zur Bremsassistentz, die, zumindest in rudimentärer Form, als flächendeckend gegebener Stand der Technik betrachtet werden darf, sind FAS für das Ausweichen, nach mehr als einem Dutzend Jahren der Forschung (z.B. Kirchner, Krüger, Mildner & Schmidt, 2005) und einiger erreichter Meilensteine (z.B. PRORETA: Isermann et al., 2015) bisher nicht verbreitet. Um das fahrphysikalisch vorhandene Unfallvermeidungspotenzial möglichst vollständig zu erschöpfen, sind die Erforschung, Entwicklung und der Einsatz von Ausweichassistentz dringend geboten.

1.3. Zielsetzung

Eine besondere Herausforderung bei der Entwicklung jeder Fahrerassistentz ist das Anzeige- und Bedienkonzept: Die Gestaltung der Schnittstelle zwischen Fahrer und Assistentzfunktion, die ihr Zusammenwirken bestimmt. Von der Qualität dieser Interaktion wiederum hängt der Nutzen eines FAS maßgeblich ab. Dies gilt in besonderem Maße für Ausweichassistentz: In der Querführung kann die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion (bei heutigen Serienlenksystemen) auch nicht vorübergehend unterbunden werden, um unerwünschte Eingaben zu ignorieren. Eine Betätigung des Fahrpedals durch den Fahrer während einer automatischen Notbremsung kann, zum Beispiel durch Entkoppeln des Getriebes, der Wirkung beraubt werden. Die Wirksamkeit eines automatischen Lenkeingriffs hingegen wird durch entgegen gerichtete Fahrereingaben am Lenkrad in vollem Umfang eingeschränkt: Fahrer und Assistentzfunktion befinden sich in der Fahrzeugquerführung in ständiger Kooperation oder Konkurrenz und müssen zur wirksamen Zielerreichung harmonisieren.

Eine optimale, nutzergerechte Systemauslegung dient jedoch nicht nur der Sicherstellung von Wirksamkeit: Sie ist auch zur Überwindung weiterer Hürden erforderlich, die den Einsatz von Ausweichassistentz erschweren. Dazu gehören die hohen Anforderungen an die Umfeldsensorik (Winner, 2015): Kenntnis über den eigenen Fahrzeugzustand, den Abstand und die Geschwindigkeit relativ zum Hindernis sind nicht mehr, wie für die Bremsassistentz, ausreichend. Es wird zusätzlich Wissen über die Position und Bewegung aller weiteren umgebenden Objekte und den nutzbaren Manövrierraum benötigt. Auch regelungstechnisch stellt die Ausweichassistentz hohe Anforderungen: Eine Trajektorienregelung in Echtzeit, womöglich mit zusätzlichen Brems- und Lenkeingriffen durch den Fahrer, ist deutlich komplexer, als die Berechnung der für eine Zielbremsung benötigten Verzögerung. Die hohe technische Komplexität bei Umfeldwahrnehmung und Regelung geht mit erhöhter Wahrscheinlichkeit für unerwünschtes Systemverhalten (Versagen elektrischer/elektronischer Bauteile, Softwarefehler) einher. Ein solches ist bei einem Querführungseingriff dazu potenziell noch folgenschwerer, als

bei einer Bremsung: Diese kann zwar nachfolgenden Verkehr gefährden, das Fahrzeug aber nicht auf Positionen lenken, die es nicht auch ohne den Systemeingriff befahren hätte. Zudem steigt mit der Komplexität der Aufgabe auch die Anzahl der Systemgrenzen. Die Kombination aus erhöhter Fehleranfälligkeit, vergrößerter Fehlervielfalt und potenziell größerer Fehlerschwere macht eine Absicherung der Eingriffe solcher Systeme unbedingt erforderlich. Nur eine für den Fahrer beherrschbare Systemauslegung kann Abhilfe verschaffen: eine nutzergerechte Auslegung solcher Funktionen ist auch aus Gründen der Kontrollierbarkeit unumgänglich, damit ein Produkt entsteht, für das auch gehaftet werden kann.

Die hier abgedruckte Arbeit setzt sich zum Ziel, erste Erkenntnisse zur Gestaltung wirksamer und kontrollierbarer Ausweichassistenten zu gewinnen und bereit zu stellen. Dies soll durch Ermittlung des Unterstützungsbedarfs von Fahrzeugführern in Ausweichsituationen, dem anschließenden Entwurf von Konzepten zu seiner Deckung, sowie der Evaluation prototypischer Umsetzungen dieser Konzepte in Nutzerstudien, geschehen. Aus den hierbei gesammelten Daten sollen Gestaltungsempfehlungen erarbeitet werden, die eine Entwicklung nutzergerecht ausgelegter Ausweichassistenten erleichtern.

2. Theoretischer Hintergrund

2.1. Begriffsklärung

Unter dem Begriff „Ausweichassistentenz“ wird im Rahmen dieser Dissertation ein Notfall-Fahrerassistenzsystem verstanden, das dem Fahrer in unfallgeneigten Fahrsituationen, in denen ein Ausweichmanöver zur Kollisionsvermeidung entweder zwingend erforderlich ist oder aus anderen Gründen (z.B. dem Verkehrsfluss) die überlegene Lösungsstrategie darstellt, zur erfolgreichen Durchführung des Manövers verhilft.

Aus dieser Aufgabenbeschreibung ist abzuleiten, dass sich der Nutzungskontext von Ausweichassistentenz auf solche Fahrsituationen beschränkt, in denen nur geringe Zeitreserven zur Kollisionsvermeidung zur Verfügung stehen. Das komfortable Umfahren eines Hindernisses (z.B. Überholmanöver) gehört nicht zum Untersuchungsgegenstand. Entsprechend meint der Begriff „Ausweichen“ im Rahmen dieser Arbeit ein „Notausweichen“ zur Abwendung einer unmittelbar bevorstehenden Kollision.

2.2. Grundlagen der nutzergerechten Gestaltung

2.2.1. Gebrauchstauglichkeit eines soziotechnischen Systems

Ein anerkanntes Maß für die Güte der Mensch-Maschine-Interaktion ist die Gebrauchstauglichkeit (englisch: Usability). In der DIN EN ISO 9241-11 (1998, 3.1) ist sie als das Ausmaß beschrieben, in dem ein Produkt durch bestimmte Nutzer in einem bestimmten Nutzungskontext genutzt werden kann, um bestimmte Ziele effektiv, effizient und zufriedenstellend zu erreichen. Als Effektivität gilt hierbei die Genauigkeit und Vollständigkeit, mit der ein Benutzer ein bestimmtes Ziel erreichen kann, als Effizienz der im Verhältnis zur Genauigkeit und Vollständigkeit eingesetzte Aufwand und als Zufriedenstellung die Freiheit von Beeinträchtigung und positive Einstellung gegenüber der Nutzung des Produkts. Diese Definition stellt klar, dass Gebrauchstauglichkeit keine globale Eigenschaft eines Produkts ist, sondern stets in Bezug auf den spezifischen Gebrauch ermittelt werden muss: Bei welcher Aufgabe unter welchen Umständen welcher Nutzer vom Produkt auf welche Weise bei der Zielerreichung unterstützt werden soll. Eine sehr breite, stabile A-Säule im Fahrzeug, beispielsweise, mag eine hohe Gebrauchstauglichkeit im Hinblick auf die Insassensicherheit bei einem Aufprall haben, aber gleichzeitig eine niedrige Gebrauchstauglichkeit in Hinblick auf die Übersicht über die Verkehrssituation im Kontext der regulären Fahrt.

Um ein soziotechnisches System hinsichtlich einer hohen Gebrauchstauglichkeit zu gestalten bedarf es der Vereinigung von Aspekten verschiedener Disziplinen, deren Gegenstand meist entweder die Technik (z.B. Elektrotechnik, Maschinenbau) oder der Mensch (z.B. Psychologie) sind. Das Konstrukt

der Gebrauchstauglichkeit ist folglich dem Arbeitsfeld der Ergonomie zuzuordnen: jener Disziplin, die sich mit den Wechselwirkungen zwischen menschlichen und anderen Elementen von Systemen befasst, um durch die Systemgestaltung das Wohlbefinden des Menschen und die Leistung des Gesamtsystems zu optimieren. In der Fahrzeuggestaltung findet die Ergonomie in vielen Bereichen Anwendung, einen Überblick hierzu geben Bubb, Bengler, Grünen und Vollrath (2015).

2.2.2. *Herstellung und Prüfung von Gebrauchstauglichkeit*

Die Erkenntnisse der Ergonomie im Rahmen der Produktentwicklung einfließen zu lassen birgt mehrere Vorteile. Für den Entwicklungsprozess sind dies vor allem eine Zeit- und Kostenersparnis (z.B. 33-50 % Zeitersparnis bei Bosert, 1991, zitiert nach Rajanen, 2003) durch Erleichterung von frühzeitigen Entscheidungen zwischen Alternativen, sowie der Gewinnung neuer Ideen, die bei einseitiger Betrachtung aus dem Blickwinkel des Entwicklers möglicherweise nicht entstehen. Für ein fertiges Produkt ist fehlende Gebrauchstauglichkeit zudem ein Wettbewerbsnachteil (z.B. 80 % Ertragssteigerung durch höhere Gebrauchstauglichkeit bei Wixon & Jones, 1991, zitiert nach Rajanen, 2003). Vor allem aber steigert die Sicherstellung von Gebrauchstauglichkeit bei der Produktentwicklung die Wahrscheinlichkeit für ein wirksames Produkt. Dies ist besonders bei Systemen, die nicht nur dem Komfort, sondern der Sicherheit dienen – wie ein Fahrerassistenzsystem, das die Fahrzeugführung in Notfallsituationen beeinflusst, um Unfälle zu verhindern – von höchster Wichtigkeit.

Zur methodischen Herstellung von Gebrauchstauglichkeit nutzen Ergonomen den Prozess des usability engineering, der grob als benutzerorientierter Entwicklungsprozess beschrieben werden kann. Hierbei wird in der Regel ein iterativer Prozess für die entwicklungsbegleitende Gewährleistung der Gebrauchstauglichkeit gefordert, dessen verschiedene Stadien nach Bedarf mehrfach durchlaufen werden sollen, um die Qualität des Endproduktes sicherzustellen. Dieser Prozess ist in drei Stadien gegliedert, die sich wie folgt beschreiben lassen: (1) Die eingängliche Prüfung des Gebrauchs in Hinblick auf Nutzer, Nutzungskontext und Ziele, mit daran anschließender Anforderungsermittlung (Analyse), (2) die Ableitung von Gestaltungsvorschlägen (Entwurf) und schließlich (3) die Prüfung und Beurteilung der vorgeschlagenen Konzepte auf die erreichte Gebrauchstauglichkeit (Evaluation).

Die in der Evaluationsphase angewendeten Methoden der usability evaluation lassen sich in zwei Kategorien einteilen: analytische Verfahren, bei denen die Gebrauchstauglichkeit durch Ergonomie-Experten beurteilt wird, und empirische Verfahren, bei denen die Gebrauchstauglichkeit mit Hilfe von Nutzern im Kontext einer tatsächlichen Interaktion beurteilt wird. Erstere sind mit geringerem Aufwand verbunden und werden vor allem in frühen Entwicklungsphasen eingesetzt, in denen noch keine Prototypen existieren, mit denen interagiert werden kann. Analytische Verfahren basieren jedoch auf Heuristiken und laufen deshalb zum Beispiel Gefahr, unerwartete Interaktionseffekte zu vernachlässigen. Sie können außerdem dort keine Anwendung finden, wo es zur Interaktion mit einem System

der betreffenden Art sowie der Art der geplanten Schnittstelle zu wenig Erfahrung gibt, um heuristische Vorhersagen überhaupt mit nennenswerter Treffsicherheit machen zu können. Gründlicher und zuverlässiger sind daher empirische Untersuchungen, bei denen Probanden unter möglichst realistischen Bedingungen bei der Interaktion mit dem Produkt beobachtet werden. Die Notwendigkeit von Nutzerstudien wird auch im Bereich der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen herausgestellt (z.B. König, 2009). Auch in entsprechenden Normen und Richtlinien zur Absicherung bezüglich der Fahrsicherheit wird ihre Durchführung angeraten (z.B. ISO 26262-9, 2011; Schwarz, 2006).

2.3. Aspekte menschlicher Wahrnehmung

Der Mensch ist in der Lage, eine Vielzahl verschiedener physikalischer Reize wahrzunehmen. Viele der vorhandenen Wahrnehmungskanäle, zum Beispiel der olfaktorische (Geruchssinn), gustatorische (Geschmacksinn) oder viszerale (Wahrnehmung der inneren Organe), kommen im Zusammenhang mit der Fahrzeugführung nicht zum Einsatz und eignen sich auch technisch nicht für eine zeitdiskrete und zeitkritische Informationsübertragung im Rahmen der Schnittstellengestaltung einer Ausweichassistentz. Bei der Betrachtung des Fahrzeugführers im Kontext von Ausweichsituationen sind vor allem die visuelle, die auditive, die vestibuläre und die somatosensorische Wahrnehmung von Interesse, deren für die Gestaltung von Ausweichassistentz relevanten Eigenschaften im Folgenden genannt werden.

2.3.1. Sehsinn

Ein großer Teil der kortikalen Kapazität ist der Verarbeitung visueller Signale gewidmet. Der Sehsinn dominiert die menschliche Wahrnehmung auch im Straßenverkehr (Johannsen, 2006; Rockwell, 1972). Dem Fahrer ist ohne diesen Fernsinn eine genaue Verortung und Verfolgung der umgebenden Objekte unmöglich, d.h. nur mit seiner Hilfe kann ein Fahrer ausreichendes Situationsbewusstsein herstellen, um eine mentale Repräsentation seines Umfelds zu erstellen und, darauf aufbauend, seine Fahraufgabe zu erfüllen.

Die Fahrerlaubnisverordnung legt fest, wie leistungsfähig dieser Sinn sein muss (siehe FEV, 2010, §12 und Anlage 6), um als straßenverkehrstauglich zu gelten. Nicht benötigt werden demnach das Stereosehen oder das Farbsehen. Gesichtsfeld und Sehschärfe unterliegen jedoch strengen Mindestanforderungen. Bei einem gesunden Menschen umspannt das Gesichtsfeld etwa 90° in beide Richtungen horizontal, sowie 60° nach oben und 70° nach unten (Schober, 1957), wobei die horizontale Ausdehnung des kombinierten binokularen Gesichtsfelds für manche Reize gar bis zu 214° beträgt (Mathur, Gehrman & Atchinson, 2013). In den Bereichen höchster Sehschärfe erreichen die Augen ein Auflösungsvermögen von etwa 0,4' bis 1' (Spektrum der Wissenschaft, 2000a).

Diese Zahlen verleiten zu einer Überschätzung der visuellen Wahrnehmung. Das Scharfsehen ist auf einen sehr kleinen Bereich des Gesichtsfelds von etwa 1° horizontal und vertikal beschränkt, der auf der Netzhaut der Foveola, dem Zentrum der Sehgrube entspricht. Zum Rand des Gesichtsfelds hin, nimmt Sehschärfe rapide ab (um 50 % je $2,5^\circ$ von der Mitte bis etwa 30° , danach noch schneller, Crossland, 2011). Das Scharfsehen ist zudem auf Reize in einer bestimmten Entfernung in Abhängigkeit der Akkomodation der Linse beschränkt. Von den durch das Auge registrierten Stimuli wird aus Kapazitätsgründen zudem nur ein geringer Teil bewusst verarbeitet. So beträgt das nutzbare Sehfeld laut Cohen (1983) bei einer Landstraßenfahrt etwa 9° - 10° bei erfahrenen und 6° - 7° bei unerfahrenen Kraftfahrern, im urbanen Stadtverkehr lediglich 5° . Die Filterung dieser Reize wird dabei durch die (selektive) Aufmerksamkeit gesteuert (z.B. Posner, Nissen & Ogden, 1978). Diese Erkenntnisse machen deutlich, dass der Sehsinn in seiner Aufnahmefähigkeit stark lokal begrenzt ist und dass das, was ein Fahrer sieht, entscheidend davon abhängt, worauf er seinen Blick richtet.

Die Steuerung des Blickes und der Aufmerksamkeit innerhalb des Gesichtsfelds erfolgt häufig intentional, aber teils auch unfreiwillig aufgrund visueller Reflexe. Itti und Koch (2001) beobachteten zum Beispiel, dass blinkendes oder flackerndes Licht in einer ansonsten statischen Szene automatisch Aufmerksamkeit erregt. Die für Helligkeit zuständigen Rezeptoren haben ihre höchste Konzentration nicht in der Mitte des Gesichtsfelds, sondern kreisförmig im Abstand von etwa 20° darum herum, womit sich Helligkeitsänderung besonders dazu eignen, in der Peripherie Aufmerksamkeit zu erregen. Auch andere Kontraständerungen wie schnelle Bewegung werden im peripheren Blickfeld gut erkannt (vgl. z.B. Abendroth & Bruder, 2015; Johansson, 1976; Johansson, 1980). Als Bewegung erkennt das menschliche Auge dabei bereits Positionsveränderungen von $20^\circ/s$ (Aubert, 1886, zitiert nach Johansson, 1978). Schnellere Bewegungen oder stärkere Kontraständerungen werden dabei besser wahrgenommen (Beusmanns, 1998; Dow, 1974; Johansson, 1978; Johansson, 1980; Schlag, Petermann, Weller & Schulze, 2009).

2.3.2. Hörsinn

Der Hörsinn ist ein weiterer Fernsinn des Menschen, dessen Beitrag zur Fahrzeugführung allerdings weitaus geringer ausfällt. Eine genaue Ortung von Geräuschquellen erfordert in der Regel visuelle Unterstützung, da die akustische Lokalisation „viel weniger präzise ist“ (Müller, Krumenacher & Schubert, 2015, S. 43). Etwaige Schallisolierung der Fahrgastzelle und/oder die Fahrgeräusche erschweren eine Informationsaufnahme durch auditive Reize aus der Fahrumgebung zusätzlich.

Auditive Reize eignen sich gut dafür, Aufmerksamkeit zu erregen (Bendixen & Schröger, 2017), Orientierungsreaktionen (Blickzuwendung auf zuvor außerhalb des Gesichtsfelds liegende Reize, Ansoorge & Leder, 2011) auszulösen (Drewing, 2017; Müller et al., 2015) und die visuelle Suche zu verstär-

ken (z.B. Quak, London & Talsma, 2015). Deshalb, und weil der echoische Speicher zudem länger zurückreicht, als der ikonische (Schlick, Bruder & Luczak, 2010), eignen sich Töne gut als Warnsignal. Als solche werden sie im Straßenverkehr auch eingesetzt: sowohl zwischen Fahrzeugen (z.B. Hupe, Einsatzhorn), als auch innerhalb von Fahrzeugen (z.B. Kollisionswarnung, vgl. Winner, 2015).

Ein großer Vorteil des Hörsinns ist, dass er aus allen Richtungen wahrnehmen kann und eine situativ ungünstige Kopfausrichtung des Fahrers nicht dazu führt, dass ein ansonsten gut wahrnehmbarer Reiz nicht detektiert wird. Zu beachten ist jedoch, dass die Fahrerlaubnisverordnung keinen Ausschluss von Gehörlosen vorsieht, solange nicht zugleich ein weiterer (zur Ausübung der Fahraufgabe wichtiger) Sinn eingeschränkt ist (siehe FEV, 2010, Anlage 4). Dies bedeutet, dass auditive Informationen einem Teil der potenziellen Nutzergruppe unter Umständen nicht oder deutlich schwerer zugänglich sind.

2.3.3. Vestibulärsinn

Die vestibuläre Wahrnehmung dient der Wahrnehmung von Beschleunigungen. Die zugehörigen Sinnesorgane setzen sich aus den im menschlichen Innenohr befindlichen Bogengang- („Drehsinn“ für Winkelbeschleunigungen) und Makulaorganen (Sinn für lineare Beschleunigungen) zusammen (Birbaumer & Schmidt, 2006). Weil es die Richtung der Gravitation und anderer auf den Körper wirkender Beschleunigungen wahrnimmt, ist das Vestibularorgan das wichtigste Element der menschlichen Gleichgewichtssteuerung, die in Kombination mit dem visuellen Sinn (zur Wahrnehmung der Raumlage), der Propriozeption (zur Wahrnehmung der Stellung und Bewegung der Körperteile) und weiteren Sinnen ausgeübt wird.

Bei der Fahrzeugführung ist die vestibuläre Wahrnehmung vor allem auf Stabilisierungsebene von Bedeutung, da sie Geschwindigkeits- oder Richtungsänderungen des Fahrzeugs erspürt. Die vestibuläre Wahrnehmung ist jedoch auch wichtig für die präzise Steuerung von Körperbewegungen und vor allem den vestibulookulären Reflex, der eine stabile visuelle Wahrnehmung trotz Kopfbewegung ermöglicht. Auch dieser Sinn nimmt in jeder Raumrichtung wahr und eignet sich auch dann zur Übertragung von Information, wenn die Aufmerksamkeit und/oder der Blick des Fahrers abgewendet sind.

2.3.4. Somatosensorik

Die Somatosensorik umfasst die Wahrnehmung von Reizen in Haut, Muskeln und Gelenken (Birbaumer & Schmidt, 2006). Dabei spielt in der Fahrzeugführung v.a. die Propriozeption eine Rolle, die den Lagesinn, der die Stellung der Körperteile wahrnimmt, den Kraftsinn, der die an den Muskeln anliegenden Kräfte wahrnimmt, und den Bewegungssinn einschließt, der die Bewegung der Körperteile wahrnimmt. Die Propriozeption ist auf Stabilisierungsebene relevant, da sie maßgeblich an allen Steu-

ereingaben des Fahrers beteiligt ist, die er zur Längsführung über (Wahl einer Getriebestufe und) Betätigung der Brems- und Fahrpedale mit den Beinen und Füßen und zur Querführung mit den Armen und Händen am Lenkrad ausführt.

Unter anderem über das Bedienelement Lenkrad gehen somatosensorisch auch Rückmeldungen aus der Fahrumgebung ein (zum Beispiel als Momentenänderung am Lenkrad, die aus einem Kippen der Fahrbahnoberfläche von rechts- nach linksgeneigt resultiert), die für die Regelung auf Stabilisierungsebene relevant sind. Da meist mindestens eine Hand des Fahrers Kontakt zum Lenkrad hält, besteht auch hier eine Möglichkeit zur Informationsübertragung bei Ablenkung oder Blickabwendung des Fahrers. Eine Rückmeldung von Kräften wird dabei in der Steuerung als führend wahrgenommen und kann die räumliche Selektion (auch unter Einfluss von Ablenkung) verbessern (Ammi & Katz, 2014). Führende Kräfte tragen zudem zu einer Reduktion von Fehlern und aufgewendeten Kräften bei und können die Aufgabenbewältigung beschleunigen (Nitsch & Färber, 2013).

2.3.5. Multimodale Reizintegration

Reize verschiedener Modalitäten werden in der Wahrnehmung zu einem Gesamteindruck integriert. Dabei ist der Integrationseffekt umso größer, je größer die räumliche (Meredith, 1986) und die zeitliche Nähe (Meredith, 1987) der Stimuli sind, und je schwächer die reaktionsevozierende Wirkung der Einzelreize ist (Meredith, 1983). Reize, die etwa zeitgleich präsentiert werden und nach der gleichen Reaktion verlangen, führen dabei zu kürzeren Reaktionszeiten und akkurateren Reaktionen (z.B. Miller, 1982; Egeth, 1991; Mordkoff, 1991; Forster, 2002). In der Steuerung kann multimodale Reizdarbietung die mentale Beanspruchung reduzieren und Leistung verbessern (Chou, 2001).

2.3.6. Kritikalitätswahrnehmung

Die subjektive Wahrnehmung und Kritikalitätsbeurteilung von Abständen und Situationen erfolgt durch Fahrer häufig proportional zur time to collision (TTC, z.B. Färber, 1986). Diese berechnet sich aus der verbleibenden Zeit, bis der Kollisionspunkt unter Beibehaltung von Richtung und Geschwindigkeit erreicht ist, und dient häufig auch objektiv als (inverses) Maß der Kritikalität. Für drohende Kollisionen im Längsverkehr machten Kodaka et al. (2003) dabei eine TTC von 1,6 s als Grenze aus, ab der Fahrer eine Situation als gefährlich wahrnehmen. Bei querenden Hindernissen erkennen Fahrer bereits ab 0,5 m Eindringtiefe in den eigenen Fahrstreifen eine Gefahr, bzw. sogar früher, wenn das Hindernis mit höherer Geschwindigkeit naht (Morawski, 2007).

2.4. Aspekte menschlichen Verhaltens

Menschliches Verhalten ist äußerst vielfältig und die potenzielle Nutzergruppe einer Ausweichassistenz von geringer Spezifität: Die den Nutzern gemeinen Eigenschaften beschränken sich auf den Besitz der Fahrerlaubnis und die dafür notwendigen Voraussetzungen, eine umfängliche Beschreibung des Nutzers im Nutzungskontext fällt deshalb schwer. Im Folgenden werden wenigstens einige Aspekte des Verhaltens genannt, die im Kontext der Fahrzeugführung in Ausweichsituationen – und damit für die Gestaltung gebrauchstauglicher Ausweichassistenz – eine Rolle spielen.

2.4.1. *Unaufmerksamkeit*

Schließt man die intentionale Herbeiführung aus, kommt eine Fahrsituation mit geringen Zeitreserven zur Kollisionsvermeidung nur dann zustande, wenn der Fahrer die Gefahr nicht früher bemerkt: entweder weil sie tatsächlich (z.B. aufgrund einer Sichtbehinderung durch Verdeckung oder Blendung) nicht früher wahrnehmbar war, weil sie fehlinterpretiert wurde, oder aufgrund von Unaufmerksamkeit. Letztere fassen Klauer et al. (2006) als Fehlen von Aufmerksamkeit bezüglich des vorwärts gerichteten Verkehrsgeschehens (zum Beispiel aufgrund von Müdigkeit oder Ablenkung durch Nebenaufgaben) und kommen bei der Analyse von Daten einer naturalistischen Feldstudie mit 100 Fahrzeugen zum Ergebnis, dass Unaufmerksamkeit bei 78% der beobachteten Unfälle zur Entstehung beigetragen hat. Aufgrund dieser Unfalldaten darf das Vorliegen von Unaufmerksamkeit des Fahrers im Anwendungsszenario einer Ausweichassistenz als wahrscheinlich gelten.

2.4.2. *Überraschung*

Unabhängig vom Grund, aus dem die Gefahr nicht früher bemerkt wurde, ist davon auszugehen, dass der Fahrer vom Auftreten der Situation überrascht ist. Vor dem Hintergrund einer plötzlichen Bedrohung ist ein Erschrecken des Fahrers möglich, was ihn in Folge einer Schrecklähmung reaktionsunfähig machen (Spektrum der Wissenschaft, 2000b), oder seine Reaktion zumindest verzögern (z.B. Dilich, Kopernick & Goebelbecker, 2002) oder weniger kontrolliert ausfallen lassen kann (Davis, 1958). Verschiedene Autoren gehen zudem davon aus, dass in kritischen Situationen oft keine Zeit für eine vollständige Situationsanalyse und bewusstes Handeln bleibt und stattdessen reflexartig reagiert wird (z.B. Kastner, 1982; Malaterre, Ferrandez, Fleury & Lechner, 1988).

2.4.3. *Kollisionsvermeidungsverhalten*

Als natürliches, reflexartiges Kollisionsvermeidungsverhalten im Straßenverkehr nimmt Kastner (1982) eine Bremsreaktion an. Da Fahrer außerhalb von Notsituationen als Reaktion auf Hindernisse (z.B. vorausfahrendes Fahrzeug hält an) häufiger mit Bremsen als mit Lenken reagieren, ist von der Bildung entsprechender Automatismen (Grandjean, 1979) auszugehen. Auch der Befund, dass Fahrer

in extremen Stresssituationen eher auf Reaktionsweisen zurückfallen, die sie häufig ausführen (Dilich et al., 2002) lässt als Reaktion auf plötzlich auftretende Hindernisse eher eine Brems- als eine Lenkreaktion erwarten. Dabei tendieren Fahrer zur Fixation auf das plötzlich auftretende Hindernis und erhöhen dadurch die Wahrscheinlichkeit, erfolgreich davon weg zu steuern (Hastings, 2005).

Die empirische Datenlage zur Häufigkeit von Lenkreaktionen in der Kollisionsvermeidung ist breit gestreut. Eine Analyse von Unfalldaten zeigt, dass in der Mehrheit der Fälle, in denen die Kollision hätte vermieden werden können, ein Ausweichmanöver das probate Mittel dazu gewesen wäre (Fernandez, 1984, zitiert nach Adams, 1994). Da Unfalldaten jedoch nur Aufschluss über Fehlschläge in der Kollisionsvermeidung geben, müssen zur allgemeinen Einschätzung des Fahrerverhaltens Probandenstudien zu Rate gezogen werden. Eine Übersicht über zahlreiche solcher Untersuchungen aus den 1960er bis 1990er Jahren findet sich bei Adams (1994). Einer der zentralen Befunde dieser Meta-Analyse ist, dass die meisten Fahrer zunächst eine Bremsreaktion zeigen.

Tabelle 1: Lenkhäufigkeiten in ausgewählten Probandenstudien zur Kollisionsvermeidung

Studie	Testumgebung	Art des Hindernisses	Situationsvariablen	Zeitmaß	Häufigkeit Lenkreaktion
<i>Kleen & Schmidt, 2009</i>	statischer Fahr Simulator	Vorausfahrendes Fahrzeug verzögert stark	Landstraßenfahrt Gegenfahrstreifen frei 135-145 kmh ⁻¹	THW 1,7 s - 2,5 s	7 %
<i>Weber et al., 2015</i>	VIL-Fahr Simulator	Fahrzeug von rechts nimmt Vorfahrt	Landstraßenfahrt Gegenfahrstreifen frei 70 kmh ⁻¹	k.A.	11 % - 38 %
<i>Schittenhelm, 2005 Situation 1</i>	Dynamischer Fahr Simulator	Vorausfahrendes Fahrzeug verzögert stark	Autobahnfahrt Seitenstreifen rechts frei 130 kmh ⁻¹	THW 1,0 s	36 %
<i>Schittenhelm, 2005 Situation 2</i>	Dynamischer Fahr Simulator	Langsameres Fahrzeug schert von rechts ein	Autobahnfahrt Fahrstreifen halb frei 150 kmh ⁻¹	TTC 2,3 s	28 %
<i>Schittenhelm, 2005 Situation 3</i>	Dynamischer Fahr Simulator	Einscherer von links verzögert stark	Autobahnfahrt Fahrstreifen links frei 130 kmh ⁻¹	k.A.	29 %
<i>Schittenhelm, 2005 Situation 4</i>	Dynamischer Fahr Simulator	Fahrzeug von rechts nimmt Vorfahrt	Landstraßenfahrt Gegenfahrstreifen frei 80 kmh ⁻¹	TTC 1,6 s	65 %
<i>Eckert et al., 2011</i>	Realfahrt Testgelände	Fahrzeug dringt von rechts in Fahrbahn ein	Landstraßen-/Stadtfahrt Gegenfahrstreifen frei 60 kmh ⁻¹	TTC 2,5 s TTC 2,0 s TTC 1,5 s	28 % 53 % - 61 % 57 %
<i>Adams et al., 1995</i>	Statischer Simulator	Fels auf Fahrbahn, verborgen hinter Kuppe	Landstraßenfahrt Gegenfahrstreifen frei 90 kmh ⁻¹	TTC 2,0 s	92 %

Tabelle 1 zeigt beispielhaft fünf aktuellere Studien, die das Kollisionsvermeidungsverhalten von Pkw-Fahrern untersuchten. Dabei zeigten sich bezüglich des Anteils der Fahrer, die auf die drohende Kollision mit einer Lenkreaktion reagieren, sehr unterschiedliche Ergebnisse. Obwohl der Anteil der Fahrer, die ein Ausweichmanöver einleiten, in manchen der genannten Studien bereits hoch ist, wird deutlich, dass längst nicht alle Fahrer von dieser Kollisionsvermeidungsstrategie Gebrauch machen, obwohl Lenken jeweils die vorteilhaftere Kollisionsvermeidungsstrategie gewesen wäre. Zwar nimmt der Anteil der Fahrer, die als Teil ihrer Kollisionsvermeidungsstrategie eine Lenkreaktion zeigen, mit geringerer TTC bzw. höherer Geschwindigkeit zu (z.B. Eckert, Hartmann, Sevenich & Rieth, 2011; Lechner & Malaterre, 1991; Stanczyk, Lozia, Pieniazek & Jurecki, 2010; für Unfalldaten Limpert & Garnerio, 1974). Dennoch unterschätzen Fahrer in den relevanten Situationen offenbar systematisch das Ausmaß der Vorteile eines Ausweichmanövers (Malaterre, 1987, zitiert nach Adams, 1994) gegenüber einer reinen Bremsung.

Über die Strategiewahl hinaus zeigt sich bei Analyse der Datenlage zudem, dass ein Teil der Probanden in Studien zwar die korrekte Strategie zur Kollisionsvermeidung wählt, aber keinen Erfolg erzielt. Der Grund dafür ist oft, dass die Reaktion zu spät erfolgt oder zu schwach ausfällt. Lechner und Malaterre (1991) stellten bei Analyse der in ihrer Studie beobachteten fehlgeschlagenen Kollisionsvermeidungsversuche zum Beispiel fest, dass bereits eine Verkürzung der Reaktionszeiten um ein Viertel einen Großteil der Kollisionen verhindert hätte. Ein weiterer Misserfolgsgrund kann eine zu intensive Lenkreaktion sein: Aus Unfalldaten lässt sich ableiten, dass mancher Unfall auch durch Sekundärkollisionen oder Abkommen von der Fahrbahn als Folge eines Verreißen beim Ausweichen entsteht (Eicher, 2012).

2.4.4. Relevante Schutzreflexe

Wird der Körper des Fahrers bei starker Verzögerung trägheitsbedingt im Fahrzeug nach vorne geworfen, ist es wahrscheinlich, dass er mit einem Abstützen am Lenkrad reagiert, was das Ausführen von Lenkbewegungen erschwert. Ein weiterer Schutzreflex, der zu einer niedrigen Quote an Lenkreaktionen bei plötzlich auftretenden Hindernissen beitragen könnte, ist die Schreckreflexreaktion, mit der ein Mensch auf plötzliche Bedrohungen reagiert (Landis & Hunt, 1939). Dabei wird (bei hinreichend starker Ausprägung) ein Großteil der Körpermuskulatur kontrahiert. Insbesondere aber werden die Finger gekrümmt und angespannt, die Ellbogen gebeugt und die Schultern nach oben gezogen, was in Summe zu einer Haltung führt, die in einem Festhalten des Lenkrads in mittlerer Stellung resultiert und Lenkbewegungen nach links oder rechts erschwert.

2.4.5. *Reaktion auf Brems- und Lenkeingriffe*

Die meisten Fahrer reagieren nicht nur auf eine drohende Kollision in der Regel zunächst mit der Betätigung des Bremspedals, sondern auch auf den Bremsingriff eines FAS. So hat sich im Rahmen von Bremsassistenten eine Teilbremsung in Gefahrensituationen in der Regel als genauso effektiv erwiesen, wie eine Vollverzögerung, da die Fahrer die systeminitiierte Bremsung rasch selbst bis zur Vollverzögerung verstärkten (Winner, 2015).

Bei Systemeingriffen in die Lenkung wurde hingegen oft eine Abschwächung durch die Fahrer beobachtet, die verhindert, dass der angestrebte Querversatz in vollem Umfang hergestellt werden konnte (z.B. Bräuchle, Flehmig, Rosenstiel & Kropf, 2013; Hesse, Schieben, Heesen, Dziennus, Griesche & Köster, 2013; Pütz, Zlocki & Eckstein, 2014). Dabei ist unklar, weshalb dies geschieht. Es ist jedoch davon auszugehen, dass Fahrer dabei oft nicht bewusst agieren, wie zum Beispiel Bender (2008) herausstellt. Einige mögliche Gründe werden bei Heesen et al. (2015) diskutiert. Zum Befund beitragen können die o.g. Schutzreflexe. Es ist ebenfalls wahrscheinlich, dass die unbewusste, umgehende Kompensation einer nicht vom Fahrer ausgelösten Lenkmomentänderung am Lenkrad ein erlerntes, prozedurales Handeln ist: Der Fahrer erlebt solche Lenkmomentänderungen im Straßenverkehrsalltag in der Regel im Rahmen externer Störungen wie böigem Seitenwind, dem Durchfahren von Schlaglöchern oder veränderter Fahrbahnneigung: In allen Fällen ist ein umgehender Lenkmomentausgleich (ein Verhindern der Lenkradbewegung) zur Kurshaltung erforderlich und erwünscht.

2.5. **Verfügbare Aktorik**

2.5.1. *Cockpitanzeigen*

Ein modernes Fahrzeugcockpit bietet in der Regel mehrere Möglichkeiten, dem Fahrer visuelle Informationen zu präsentieren. Eine Übersicht findet sich bei Knoll (2009).

Mittig vor dem Fahrer, unterhalb der Windschutzscheibe, befindet sich das Kombiinstrument. Moderne Kombiinstrumente sind nicht mehr auf analoge Anzeigen beschränkt, sondern verfügen über eine oder mehrere digitale Anzeigen, auf denen beliebige optische Inhalte geschaltet werden können. Viele Fahrzeuge verfügen zudem über eine, ebenfalls digitale, Anzeige in der Mittelkonsole. Beide dürfen als ungeeignet als Warnanzeigen im Rahmen einer Ausweichassistenten gelten: Sie erfordern zumindest eine teilweise Blickabwendung vom Verkehrsgeschehen vor dem Fahrzeug, die als kontraproduktiv bewertet werden muss. Dies trifft auch auf viele Warnleuchten an anderer Stelle zu, wie sie beispielsweise für die Totwinkelassistenten eingesetzt werden (z.B. Wolkenstein, 2005).

Einige Fahrzeuge verfügen über Anzeigemöglichkeiten in der Windschutzscheibe (head up display, HUD). Eine solche eignet sich besonders zur Darstellung fahrrelevanter Informationen ohne Blickabwendung vom Verkehrsgeschehen (Knoll, 2009). Einblendungen in die Windschutzscheibe werden bereits zur Warnung des Fahrers benutzt, auch als Kollisionswarnung (z.B. Volvo Car Corporation, 2017). Weber (2012) untersuchte bereits die Verwendung als Warnanzeige im Zusammenhang mit Ausweichassistenten.

2.5.2. Lautsprecheranlage

Die Lautsprecheranlage kann dazu verwendet werden, den Fahrer auf dem auditiven Kanal zu warnen. Warntöne werden bereits vielfach eingesetzt: vom Hinweis auf einen niedrigen Scheibenwasserstand bis zur Warnung vor Kollisionen (z.B. AUDI AG, 2016; Volvo Car Corporation 2017). Moderne Lautsprechersysteme sind dabei in der Lage, Raumklang zu emulieren und Tönen damit räumliche Information zu verleihen. Zudem kann ein modernes Infotainment-System im Falle einer Warnung automatisch anderen Geräusch-Output (z.B. Musik) in der Lautstärke reduzieren.

2.5.3. Lenksystem

Ein Überblick über die Lenksysteme in Radkraftfahrzeugen findet sich bei Reimann, Brenner und Büring (2009). Moderne Fahrzeuge verfügen in der Regel über ein Lenkhilfesystem („Servolenkung“). Ein Beispiel dafür ist die sehr verbreitete elektromechanische Lenkunterstützung (electric power steering, EPS). Sie verfügt über einen Elektromotor, der an der Lenksäule oder der Zahnstange der Fahrzeuglenkung drehen kann. Dadurch können Hilfskräfte bereitgestellt werden, die eine relativ kleine Lenkübersetzung bei vergleichsweise geringem Kraftaufwand für den Fahrer ermöglichen.

Die Überlagerung des vom Fahrer aufgetragenen Lenkmoments mit einem vom Lenkhilfesystem aufgetragenen Lenkmoment eröffnet auch darüber hinaus gehende Einsatzmöglichkeiten im Rahmen einer Ausweichassistenten. Erstens kann der Fahrer über seinen propriozeptiven Kanal angesprochen und eine haptische Warnung oder Handlungsaufforderung übermittelt werden. Zweitens können die Lenkeingriffe des Fahrers korrigiert werden: durch unterstützende Lenkmomente, wenn er zu schwach lenkt, oder durch entgegen gerichtete, wenn er übersteuert.

Aktivlenkungen verfügen über einen zusätzlichen Freiheitsgrad. Damit kann die Lenkübersetzung dynamisch verändert und effektiv ein zusätzlicher Lenkwinkel überlagert werden, der an der Achse gestellt wird. Diese Lenkwinkelüberlagerung eröffnet im Rahmen der Ausweichassistenten noch mehr Möglichkeiten (und potentiell höhere Wirksamkeit), als die Lenkmomentüberlagerung. Aufgrund der eingeschränkten Rückmeldung an und Kontrolle durch den Fahrer, ist jedoch mit eingeschränkter Beherrschbarkeit eines lenkwinkelüberlagernden Ausweicheingriffs zu rechnen. Im Gegensatz zur EPS ist die Verbreitung von Überlagerungslenkungen zudem noch gering.

Ähnliches trifft auf *steer-by-wire* Systeme zu, die auf eine mechanische Kopplung zwischen Lenkrad und Achse gänzlich verzichten. Damit ermöglichen sie dem Entwickler die größte Freiheit zur Umsetzung von Querführungsassistenten. Interessant ist dabei zusätzlich der Aspekt der Bedienelementgestaltung, da das klassische Lenkrad für ein solches System nicht benötigt wird. Die Bedenken bezüglich der Kontrollierbarkeit eines solchen Systems sind jedoch nicht nur für den Fall eines System- (und damit Lenkungs-)ausfalls gegeben, sondern auch für Eingriffe eines solchen Lenksystems, die nicht am Lenkrad an den Fahrer rückgemeldet werden, wie eine Studie von Heesen et al. (2015) zeigt.

2.5.4. *Bremssystem*

Herkömmliche, hydraulische Lenksysteme werden bei Remfrey, Gruber und Ocvirk (2009) behandelt, elektromechanische *brake-by-wire* Systeme bei Bayer et al. (2009). Für den Fahrer, und damit für die Gestaltung der Mensch-Maschine-Interaktion, macht die zu Grunde liegende Wirkweise im Kontext der Ausweichassistenten keinen Unterschied und ist damit irrelevant.

In einem Ausweichszenario ist selbstverständlich wichtig, dass die Funktionen des ABS, der ASR und des ESC zur Verfügung stehen. Das Bremssystem kann im Rahmen einer Ausweichassistenten aber auch darüber hinaus Anwendung finden. Eine Beitragsmöglichkeit ist ein Bremsruck (Winner, 2015), der den Fahrer über den vestibulären Kanal warnt und u.a. durch das entstehende Trägheitsmoment eine physische Blickzuwendung des Fahrers nach vorne begünstigt. Eine zweite Möglichkeit ist die Durchführung einer begleitenden Teilbremsung. Eine dritte Möglichkeit besteht unter Verwendung der Einzelradbremse: Durch einseitiges (oder einseitig gewichtetes) Verzögern des Fahrzeugs kann in gewissem Umfang ein Giermoment erzeugt werden, das dazu genutzt werden kann, Einfluss auf die Querführung zu nehmen und einen Lenkeingriff des Fahrers zu verstärken oder abzuschwächen.

2.5.5. *Andere Aktorik*

Selbstverständlich sind weitere Möglichkeiten denkbar, wie das Fahrzeug mit dem Fahrer interagieren kann, zum Beispiel eine Vibration von Lenkrad (z.B. Vukotich, Popken, Rosenow & Lübcke, 2008), Sitz (z.B. Sayer, T. B., Sayer, J. R. & Devonshire, 2005) oder Fahrpedal. Viele dieser Warnungen sind für eine Nutzung im Rahmen einer Ausweichassistenten jedoch zu unspezifisch oder aus anderem Grunde uninteressant.

Als Ausnahme hierzu sei ein vollaktives Fahrwerk genannt: Ein solches kann durch aktive Wankbewegungen des Fahrzeugs den Radsturz verändern und somit ein Wanklenken induzieren. Dieses ist weitestgehend unabhängig von Lenkvorgaben am Lenkrad und ermöglicht so die Verstärkung oder Abschwächung der fahrerseitigen Lenkvorgabe. Der Einsatz von aktivem Wanklenken als vom Lenkrad unabhängige Querführungsmechanik wurde von Müller, Siedersberger, Färber und Popp (2016) im Rahmen einer automatischen Spurführung demonstriert.

2.6. Optimierungskriterien: Wirksamkeit und Kontrollierbarkeit

Es wurden Aspekte des Nutzungskontexts und des Nutzers von Ausweichassistentz als Gestaltungsrahmen und -grundlage betrachtet. Es folgt die Betrachtung des Nutzungsziels und der Gestaltungskriterien.

Da eine Ausweichassistentz effektiv, effizient und zufriedenstellend zur Kollisionsvermeidung beitragen soll, scheint die Gebrauchstauglichkeit einer Ausweichassistentz vor allem durch ihr Wirkpotential definiert. Wird als Ziel jedoch eine Erhöhung der Sicherheit im Gesamten angesetzt, muss eine gebrauchstaugliche Ausweichassistentz nicht nur wirksam, sondern auch kontrollierbar und gebrauchssicher sein. Wirksamkeit und Kontrollierbarkeit stehen einander dabei häufig entgegen: Was viel hilft, kann auch viel schaden, und was kaum schaden kann, kann auch kaum helfen. Die Auflösung dieses Zielkonflikts sollte nach Eckstein, Schwalm und Zlocki (2015) dem Grundsatz von Kontrollierbarkeit als zwingender Voraussetzung und Wirksamkeit als höchstem Ziel folgen.

2.6.1. *Wirksamkeit*

Die Ausweichassistentz soll zur Kollisionsvermeidung beitragen. Dafür muss sie in der Lage sein, entweder direkt, oder mittelbar über den Fahrer, Einfluss auf das Lenkverhalten des Fahrzeugs zu nehmen. Die Wirksamkeit ist in erster Linie dadurch bestimmt, ob (Effektivität) und wie viel einfacher (Effizienz) ein Fahrer mit Ausweichassistentz eine Primärkollision mit dem Hindernis durch Ausweichen verhindern kann. Die Wirksamkeit scheint zunächst umso höher, je häufiger, früher und intensiver das System bei Bedarf eingreift.

Neben den technischen Grenzen der Aktoren für die maximale Eingriffsintensität sprechen jedoch auch Aspekte der Mensch-Maschine-Interaktion gegen eine (alleinige) Maximierung der Wirksamkeit: Die Akzeptanz und die Kontrollierbarkeit durch den Fahrer.

2.6.2. *Akzeptanz als moderierender Faktor*

Greift eine Ausweichassistentz sehr früh ein, liegt aus Sicht des Fahrers möglicherweise noch kein Notfall vor. Er empfindet den Eingriff als unnötig und fühlt sich in der Folge bevormundet. Zu den gefühlt überflüssigen Auslösungen gesellen sich bei sehr frühem Eingriff aufgrund schrumpfender Vorhersagesicherheit auch eine höhere Zahl tatsächlich unberechtigter Auslösungen (Hoffmann & Gayko, 2015). Dies kann dazu führen, dass der Nutzer das System deaktiviert oder nicht kauft, oder dass der Fahrer die Warnungen des Systems nach einiger Zeit nicht mehr ernst nimmt. In diesen Fällen fehlender Akzeptanz ist das Ergebnis eine verminderte bis negierte Wirksamkeit. Fehlende Akzeptanz kann darüber hinaus auch aus mangelnder Kontrollierbarkeit entstehen.

2.6.3. *Kontrollierbarkeit*

Gemäß Art. 8, Abs. 5 des in der Bundesrepublik Deutschland ratifizierten Wiener Übereinkommens über den Straßenverkehr, muss der Fahrzeugführer in der Lage sein „dauernd sein Fahrzeug [zu] beherrschen“ (BGBl. II, 1977, S. 821). Die Prüfung und Sicherstellung der Kontrollierbarkeit von Fahrerassistenzsystemen wird auch im internationalen Standard, wie der ISO 26262, und Gestaltungsleitfäden wie dem RESPONSE Code of Practice (Schwarz, 2006) gefordert.

Dies dient der Absicherung: sowohl gegenüber elektrisch/elektronischer Fehler (ISO 26262-9, 2011), als auch gegenüber funktionalen Unzulänglichkeiten und Systemgrenzen: Situationen, in denen das System unangemessen (nicht) auslöst, dabei im Rahmen seiner Spezifikation aber korrekt arbeitet. Im Rahmen vollständiger Gebrauchssicherheit ist darüber hinaus auch die Betrachtung berechtigter Auslösungen notwendig (vgl. z.B. Huesmann, Farid & Muhrer, 2015), da ein Eingriff auch im Nutzenfall ein (sekundäres) Schadensereignis zur Folge haben kann. Weitere Aspekte der Kontrollierbarkeit sind die Absicherung gegen Fehlgebrauch, sowie die Kontrollierbarkeit aus Sicht anderer Verkehrsteilnehmer (für Ausweicheingriffe siehe hierzu z.B. Rüger, Nitsch & Färber, 2015). Im Rahmen der hier abgedruckten Arbeit werden zunächst nur die Kontrollierbarkeit im Nutzenfall, sowie die Kontrollierbarkeit bei unberechtigter Systemauslösung betrachtet.

2.6.4. *Bisherige Vorgaben*

Erkenntnisse zur optimalen Parametrierung von Eingriffen in die Fahrzeugquerführung wurden bisher vor allem in Bezug auf kontinuierlich regelnde Systeme wie eine Spurhalteassistentz veröffentlicht (z.B. Mann, 2008). Diese Gestaltungsrichtlinien, sowie bisherige Grenzwerte und Anhaltspunkte zur Bestimmung von Kontrollierbarkeit für Lenkeingriffe oder Lenksystemstörungen (siehe z.B. Neukum & Krüger, 2003; Neukum, & Reinelt, 2005; Schmidt, 2009), erscheinen im Kontext der Ausweichassistentz, die weitaus stärkere Eingriffe erfordert, unangebracht.

Eine Methode zur Bestimmung der Kontrollierbarkeit solcher Systeme anhand von Pass-/Fail-Kriterien wurde von Neukum et al. (2013) vorgeschlagen. Hierbei dient eine subjektive Einschätzung der Kontrollierbarkeit durch die Probanden in Form der Skala zur Bewertung von Störungen (SBS, Neukum & Krüger, 2003) als Grundlage. In einem sequentiellen Verfahren wird geprüft, ob Probanden den erlebten Systemfehler auf der SBS als gefährlich oder gar unkontrollierbar bewertet haben. Machen diese Urteile weniger als 15 % aller Urteile aus, wird in einem zweiten Schritt geprüft, ob die beobachteten fahrdynamischen Kenngrößen bei den Fahrten, die als gefährlich oder unkontrollierbar bewertet wurden, innerhalb von zwei Standardabweichungen um den Mittelwert der Verteilung „objektiver Kenngrößen akzeptierter Fehler“ (Neukum et al., 2013, S. 53) liegen. Treten in einem der Fälle größere fahrdynamische Werte auf oder beurteilen mehr als 15 % der Probanden den Systemfehler als

gefährlich oder unkontrollierbar, gilt er als nicht tolerierbar. Ungelöst bleibt dabei bisher das Problem, dass eine Referenz für diese objektiven Kenngrößen im Zusammenhang mit Ausweichassistenten nicht bekannt ist.

2.6.5. *Gewählte Kriterien*

Im Rahmen der hier abgedruckten Arbeit wird die Wirksamkeit der jeweils getesteten Ausweichassistenten unterschiedlich bemessen: Die Wirksamkeitskriterien richten sich in der zugehörigen Evaluation danach, welches Unterstützungskonzept das jeweilige System verfolgt, und ob es damit erfolgreich ist.

Die Kontrollierbarkeit wird im Rahmen dieser Arbeit im Fall der berechtigten Systemauslösung danach bemessen, ob Sekundärkollisionen (Zusammenstöße mit einem anderen Objekt als dem eigentlichen, primären Hindernis) oder ein Verlassen der Fahrbahn eintraten, bzw. wie weit das Fahrzeug in den benachbarten Fahrstreifen eindrang. Im Falle der unberechtigten Systemauslösung wird sie danach bemessen, welcher unerwünschte Querversatz resultiert und ob dabei sogar der Fahrstreifen verlassen wurde, und wie viel unerwünschte Verzögerung erzeugt wurde und ob dabei sogar starke Bremsungen (mit mehr als 7 ms^{-2}) auftraten.

Die Akzeptanz wird im Rahmen dieser Arbeit jeweils anhand einer Probandenbefragung grob abgeschätzt.

2.7. Aspekte der Untersuchungsmethodik

Eine allgemeine Übersicht zu möglichen Methoden der Messung von Fahrerverhalten findet sich bei Krens, Henning und Petzoldt (2009).

2.7.1. *Durchführbarkeit*

Für die Evaluation von Gebrauchstauglichkeit wird das Zusammenspiel des soziotechnischen Systems idealerweise in genau dem Kontext beobachtet, in dem das Produkt zur Anwendung kommen soll: Bei Fahrerassistenzsystemen folglich im öffentlichen Straßenverkehr. Situationen, die ein Notausweichen erfordern, stellen jedoch seltene Ereignisse dar, deren gezielte Beobachtung in natürlicher Umgebung in ausreichender Zahl unverhältnismäßig aufwendig erscheint. Da diese Methode zudem weder die experimentelle Manipulation unabhängiger Variablen, noch die experimentelle Kontrolle von Störvariablen erlaubt, mangelt es solchermaßen erhobener Daten an Vergleichbarkeit, was den gezielten Erkenntnisgewinn erschwert.

Gegen ein solches Vorgehen sprechen außerdem ethische Schranken. Zum einen wäre es nicht nur aus juristischer Sicht ein Fehlverhalten, eine noch nicht abgesicherte, prototypische Assistenzfunktion ohne Straßenzulassung außerhalb einer kontrollierten Umgebung zu testen. Zum anderen darf eine

Nutzerstudie, auch wenn die realen Anwendungsszenarien eines Systems eine Verletzungs- oder gar Lebensgefahr für den Benutzer beinhalten, ihre Teilnehmer keiner tatsächlichen Gefahr aussetzen. Nutzerstudien zur Ausweichassistenz müssen in kontrollierter Umgebung stattfinden und relevante kritische Situationen müssen gefahrungsfrei nachgestellt werden. Auch hierfür bestehen unterschiedliche Möglichkeiten. Eine Übersicht einiger Methoden zur Erprobung von in Notfällen eingreifender FAS findet sich bei Bock, Siedersberger, Zavrel, Breu und Maurer (2005).

2.7.2. *Verhaltensvalidität*

Hierbei muss stets kritisch betrachtet werden, wie valide die gewählte Methode in Bezug auf den Untersuchungsgegenstand ist: d.h. in welchem Maß die gewonnenen Erkenntnisse auch für den realen Nutzungskontext gelten. Ein intuitives Maß für die Validität einer Fahrstudie wäre die subjektive Einschätzung durch Nutzer, als wie realistisch die gewählte Methode empfunden wird (entsprechend der Augenscheinvalidität von Testverfahren, vergleiche Holden, 2010). Dieses Maß ist jedoch unzureichend (Kaptein, Theeuwes & van der Horst, 1996). Aussagekräftiger scheint die ökologische Validität (z.B. Mullen, Charlton, Devlin & Bedard, 2011): das Ausmaß, in dem die Eigenschaften der Untersuchungsumgebung mit dem realen Nutzungskontext übereinstimmt. Blaauw (1982) bezeichnet diese Übereinstimmung der gewählten Untersuchungsumgebung mit dem realen Nutzungskontext im Hinblick auf Aufbau und Interaktion (z.B. Rückmeldung von Kräften an Bedienelementen) als physikalische Validität („physical validity“) und stellt heraus, dass diese nicht immer in allen Belangen gegeben sein muss, um valides Verhalten zu erzeugen: Hierfür wird der Begriff der Verhaltensvalidität („behavioral validity“) eingeführt. Diese wird in zwei Klassen eingeteilt: Absolute Verhaltensvalidität sei gegeben, wenn sich Messwerte für beobachtetes Verhalten in der Untersuchungsumgebung von denen im realen Nutzungskontext nicht unterscheiden (Blaauw, 1982). Relative Verhaltensvalidität sei gegeben, wenn sich die Messwerte in der Untersuchungsumgebung von denen im realen Nutzungskontext zwar numerisch unterscheiden, aber eine ähnliche Größe besitzen und in die gleiche Richtung gehen (Godley, Triggs & Fildes, 2002). Im Allgemeinen ist die Wahl der Methodik in der Regel mit einem Kompromiss zwischen dem Ausmaß an experimenteller Kontrolle auf der einen, und dem der Verhaltensvalidität auf der andere Seite, die zueinander oft gegenläufig sind (Purucker, Rieger, Schneider, Neukum & Färber, 2014).

Bei Fahrversuchen finden häufig Fahrsimulatoren Anwendung. Sie gewährleisten die Sicherheit der Probanden und bieten zugleich die Möglichkeit, beliebige Versuchsszenarien darzustellen und reliabel zu reproduzieren. Dabei existieren unterschiedliche Arten von Simulatoren, die sich in ihrer ökologischen Validität stark unterscheiden: Angefangen vom einfachen statischen Simulator mit einem Lenkrad und einer Pedalerie, die vor einem Monitor aufgebaut sind, bis hin zu technisch höchst aufwendigen dynamischen Fahrsimulatoren. Dabei sitzt beispielsweise ein echtes Fahrzeug in einer mit einer

360°-Projektionsleinwand ausgekleideten Kuppel, die sich zur Simulation der Fahrdynamik wiederum auf einer Plattform befindet, die in alle Richtungen gekippt und gedreht, sowie auf Schlittensystemen hin und her gefahren werden kann. Fahrsimulatoren eignen sich als Werkzeug zur Untersuchung einer Vielzahl von Fragestellungen. Ihre Verhaltensvalidität ist jedoch stark vom Untersuchungsgegenstand abhängig und oft nicht in vollem Maße gegeben (z.B. Spurhaltung: Blaauw, 1982; Blickverhalten: Victor, 2005; eine Übersicht gibt auch Blana, 1996). Viele Validitätsuntersuchungen bescheinigen Simulatoren relative, aber nicht absolute Verhaltensvalidität (Mullen et al., 2011). Nicht zuletzt deshalb gelten Fahrsimulatoren als außer Stande, eine abschließende Bewertung des Fahrerverhaltens zu ermöglichen (vgl. z.B. Schmitt, Färber, Maurer & Breu, 2006) und machen zur Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit von Ausweichassistenten zusätzlich andere Methoden erforderlich. In Bezug auf das Kollisionsvermeidungsverhalten sollte eine besonders kritische Validitätsprüfung erfolgen, da bei entsprechenden Manövern häufig hohe fahrdynamische Kräfte auftreten, die selbst sehr leistungsfähige dynamische Fahrsimulatoren nicht immer physikalisch valide abbilden können.

2.7.3. *Gewählte Methoden*

Im Rahmen der hier abgedruckten Arbeit wurde das Fahrerverhalten beim Ausweichen und der Interaktion mit Ausweichassistentenfunktionen in Experimenten gemessen, die auf einer abgeschlossenen Teststrecke durchgeführt wurden. Dabei kamen zwei Werkzeuge zum Einsatz: der vehicle in the loop (VIL)-Fahrsimulator und die Hindernisattrappe CAPLOS (compressed air powered laterally approaching obstacle simulator) des Instituts für Arbeitswissenschaft (IfA) an der Universität der Bundeswehr (UniBw) München. Die beiden Hilfsmittel, sowie die verwendeten Versuchsträger und zugehörigen Messaufbauten, werden im Kapitel 5 beschrieben.

3. Fragestellung

Die hier abgedruckte Arbeit thematisiert die nutzergerechte Auslegung von Ausweichassistenten. Forschungsgegenstand ist die Interaktion von Mensch und Maschine im Zusammenhang mit Fahrerassistenzsystemen für Ausweichmanöver.

In den vorangegangenen Kapiteln wurde erläutert, aus welchem Grund eine Beschäftigung mit Ausweichassistenten sinnvoll ist, weshalb die nutzergerechte Auslegung wichtig ist, was nutzergerechte Auslegung ist und welchem Prozess sie folgt, was das Ziel und die zu optimierenden Kriterien von Ausweichassistenten sind und welche Parameter Nutzer und Nutzungskontext beitragen. Auf dieser Grundlage aufbauend soll die Fragestellung der Arbeit beantwortet werden.

Dem Prozess zur Herstellung von Gebrauchstauglichkeit folgend ist diese zunächst analytischer, heuristischer und explorativer Natur:

- Welcher Unterstützungsbedarf lässt sich für Fahrer in Ausweichsituationen ableiten?
- Welche Unterstützungskonzepte lassen sich zur Deckung dieses Bedarfs ableiten?
- Auf welche Weise können diese Unterstützungskonzepte in einer Fahrerassistenzfunktion umgesetzt werden?

Diese entworfenen Fahrerassistenzfunktionen sollen daraufhin auf ihre Gebrauchstauglichkeit hin evaluiert werden. Dies soll in Probandenstudien geschehen. Die gesammelten Daten sollen dabei einerseits inferenzstatistisch bezüglich der jeweiligen Wirksamkeits- und Kontrollierbarkeitshypothesen ausgewertet, als auch deskriptiv auf Muster untersucht werden, die zur weiteren Hypothesenbildung herangezogen werden können.

- Welche Anhaltspunkte ergeben sich für die Wirksamkeit der getesteten Assistenzfunktionen im Nutzenfall?
- Welche Anhaltspunkte ergeben sich für die Kontrollierbarkeit der getesteten Assistenzfunktionen im Nutzenfall?
- Welche Anhaltspunkte ergeben sich für die Kontrollierbarkeit der getesteten Assistenzfunktionen im Falle einer Falschauslösung?
- Welche Anhaltspunkte ergeben sich für den Einfluss von Unterschieden der jeweils gewählten Aktorik oder Parametrierung der Assistenzfunktion?

Der letzte Teil der bearbeiteten Fragestellung betrifft die Formulierung von Gestaltungsempfehlungen für Ausweichassistentensysteme von hoher Gebrauchstauglichkeit. Hierzu soll die Datenlage aggregiert

und daraus abgeleitet werden, welche Parameter sich in welchem Zusammenhang als vorteilhaft erwiesen haben, welchen Ergänzungsbedarf und welche Ergänzungsmöglichkeiten die untersuchten Konzepte aufweisen, aber auch wo die Grenzen der gewonnenen Erkenntnisse liegen.

4. Konzepte für Ausweichassistenz

4.1. Abgeleiteter Unterstützungsbedarf der Fahrer

Insgesamt sind in Bezug auf das Notausweichenverhalten bei drohenden Kollisionen im Straßenverkehr folgende potentielle Schwächen im Fahrerverhalten festzustellen:

- falscher Aufmerksamkeitsfokus,
- falsche Strategiewahl,
- zu lange Reaktionszeit,
- nicht ausreichend kräftige Lenkreaktion,
- übermäßig kräftige Lenkreaktion.

Aus diesen Fahrerschwächen wiederum lassen sich, wie Tabelle 2 zeigt, Unterstützungsmöglichkeiten auf allen Ebenen des Handelns ableiten.

Um von diesen Unterstützungsmöglichkeiten Gebrauch zu machen, sind drei grundlegende Typen von Assistenz denkbar, die über eine reine Kollisionswarnung (die mangels Spezifität nicht als Ausweichassistenz gelten soll) hinaus gehen: Ein System kann dem Fahrer (1) bei der Handlungsauswahl assistieren und ihn zur Durchführung eines Ausweichmanövers auffordern (Ausweichempfehlung, Wirkweise A), (2) bei der Handlungsdurchführung unterstützen und den Verlauf des Ausweichmanövers mitgestalten (Ausweichunterstützung, Wirkweise C α_{II}), oder (3) dem Fahrer durch Handlungsübernahme assistieren und das Ausweichmanöver automatisch durchführen (Ausweichautomatik, Wirkweise C β_{II} oder C γ_{II}). Vergleiche Abbildung 6.

Tabelle 2: Unterstützungsmöglichkeiten durch Fahrerassistenz zur Kompensation potentieller Fahrerschwächen beim Notausweichen

Ebene des Handelns	Informationsverarb.	Planung	Umsetzung
Möglichkeit der Unterstützung	<ul style="list-style-type: none"> • Aufmerksamkeit auf Fahrsituation lenken • Handlungsbedarf ersichtlich machen 	<ul style="list-style-type: none"> • Korrekte Strategiewahl fördern • Strategiewahl beschleunigen 	<ul style="list-style-type: none"> • Einleiten der Lenkreaktion beschleunigen • Ausführung der Lenkreaktion erleichtern

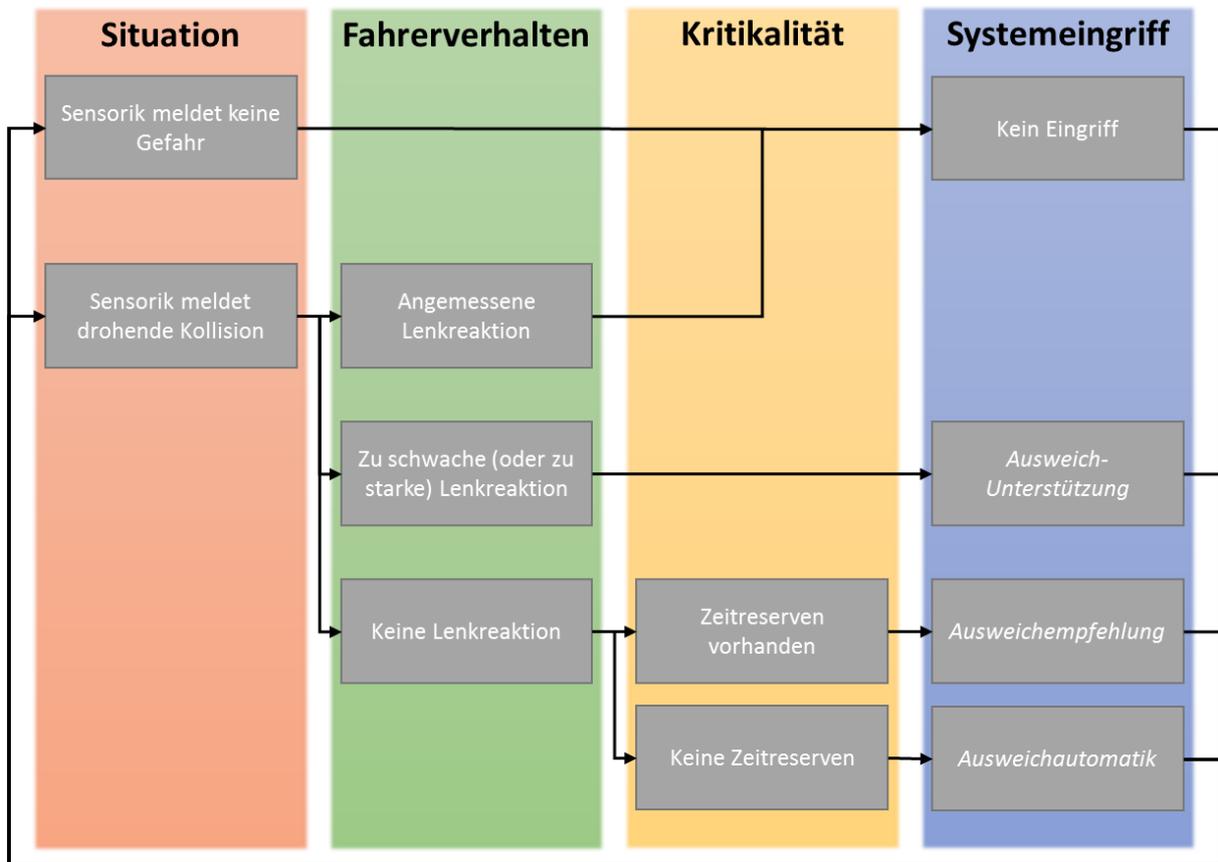


Abbildung 6: Wirkschema einer umfassenden Ausweichassistenten

Im Folgenden werden verschiedene Konzepte für die drei genannten Funktionen dargelegt, diskutiert und ausgewählt. Diese werden anschließend in den Kapiteln 6, 7, 8 und 9 beschriebenen Experimenten auf ihre Gebrauchstauglichkeit hin evaluiert.

4.2. Ausweichunterstützung

Eine Ausweichassistenten in Form einer Ausweichunterstützung wird nur und erst dann ausgelöst, wenn der Fahrer einen Ausweichvorgang initiiert. Sie soll den Fahrer bei der Durchführung des Lenkvorgangs unterstützen. Dies kann in unterschiedlichem Umfang geschehen:

- Eine sehr einfache Form der Ausweichunterstützung kann, ohne Detailwissen über die aktuelle Fahrsituation, die Lenkvorgabe des Fahrers pauschal (ohne Anpassung des Ausmaßes an die individuelle Fahrsituation) verstärken. Inspiration hierzu liefern einfache Bremsassistenten, die allein aufgrund eines sehr schnellen Wechsels von der Betätigung des Fahr-, hin zu einer (starken) Betätigung des Bremspedals, auf die Intention des Fahrers schließen, eine Gefahrenbremsung vornehmen zu wollen. Eine einfache Variante einer Ausweichunterstützung

könnte analog anhand von Fahrereingaben (z.B. einer sehr hohen Lenkradwinkelgeschwindigkeit) schließen, dass der Fahrer ein Ausweichmanöver durchführen möchte, und daraufhin einen lenkungsverstärkenden Eingriff vornehmen.

- Eine höher entwickelte Ausweichunterstützung erlaubt ein differenzierteres Vorgehen, stellt aber auch höhere Anforderungen an die maschinelle Wahrnehmung. Diese darf sich nicht auf Fahrereingaben beschränken, sondern muss das Verkehrsumfeld einbeziehen. Hierbei kann das Lenkverhalten des Fahrers auf eine, der individuell vorliegenden Fahrsituation angepasste, Weise unterstützt werden – bis hin zu einer vollständigen Trajektorienführung, bei der die Lenkeingriffe des Systems in Echtzeit genau so angepasst werden, dass die kombinierten Lenkvorgaben von Fahrer und System exakt im optimalen Ausweichpfad resultieren.

Zwischen den dargestellten Extremen sind zahlreiche Ausprägungen einer Ausweichunterstützung mit unterschiedlichem Unterstützungsgrad bezüglich Eingriffsausmaß und „-Intelligenz“ (im Sinne der individuellen Anpassung an die Fahrsituation) denkbar. Angemerkt sei, dass eine Ausweichunterstützung, die eine Trajektorienführung ermöglicht, alle Voraussetzungen einer Ausweichautomatik erfüllt. Sie unterscheiden sich nur darin, ob der Aktivierung der Trajektorienführung eine Ausweichbewegung des Fahrers vorangeht.

Zur direkten Einflussnahme auf die Querführung sind verschiedene Aktoren denkbar. Gedanklich am nächsten liegt eine Lenkmomentüberlagerung. Um einen fahrerseitigen Lenkeingriff zu verstärken, stellt der Elektromotor der EPS ein zum Handlenkmoment des Fahrers gleichgerichtetes zusätzliches Lenkmoment. Im Falle einer Trajektorienführung könnten vom System auch korrigierend Lenkmomente in der Gegenrichtung gestellt werden. Bei einer Lenkwinkelüberlagerung (oder bei entkoppelter Lenkung) wäre die direkte haptische Momentenrückmeldung am Lenkrad nicht vorhanden. Damit würde die potenziell führende Wirkung dieser Kräfte auf den Fahrer (vgl. Kapitel 2.3.4) entfallen. Andere Aktoren erscheinen im Rahmen der Ausweichunterstützung schlicht als zu wenig wirksam (z.B. etwa maximal 5%/s durch einseitige Bremsung). Gegen eine Lenkwinkelüberlagerung und ein Wanklenken durch vollaktives Fahrwerk spricht zudem deren geringe Verfügbarkeit.

Begleitende Warnungen, Bremseneingriffe oder andere Signale werden im Rahmen der Ausweichunterstützung als potenziell abträglich eingestuft. Da sie nur eingreift, wenn der Fahrer ein Ausweichmanöver einleitet, ist davon auszugehen, dass dieser die Fahrsituation im Wesentlichen erfasst hat. Weitere Warnungen oder Hinweise auf die drohende Kollision bergen somit keinen Vorteil, sondern lediglich die Gefahr, den Fahrer zu erschrecken oder seine Aufmerksamkeit zu binden und ihn damit in der Ausführung der bereits korrekt ergriffenen Handlung zu stören. Ein solcher, die Manöverausführung behindernder, Effekt durch unerwartete Reize ist auch bei Lenkeingriffen denkbar, die dem Fahrer nicht über die Standardschnittstelle Lenkrad rückgemeldet werden. Dies spricht als weiterer Grund

gegen die Verwendung von einseitiger Bremsung, Wanklenken, Lenkwinkelüberlagerung oder entkoppelter Lenkung. Im Falle der einseitigen Bremsung oder einer begleitenden Bremsung ist zudem zu befürchten, dass die Lenkreaktion des Fahrers dadurch behindert wird, dass er sich am Lenkrad abstützen muss (vgl. Kapitel 2.4.4). Ein Bremseneingriff inmitten des bereits laufenden Ausweichmanövers erscheint auch aus fahrdynamischen Gründen (Summierung von Längs- und Querkräften am Reifen, Kammscher Kreis) unsinnig. Eine begleitende Bremsung erscheint zudem deshalb unnötig, da Fahrer in aller Regel von sich aus zunächst bremsen (vgl. Kapitel 2.4.3) – wird nur gelenkt, ist davon auszugehen, dass eine Bremsung tatsächlich unerwünscht ist.

Da eine Trajektorienführung im Rahmen der Ausweichautomatik (Kapitel 4.4) näher betrachtet wird, wird stattdessen eine Variante der Ausweichunterstützung getestet, die mit geringeren Anforderungen an die maschinelle Wahrnehmung und Informationsverarbeitung einhergeht: Eine (nicht situationsadaptive) Lenkverstärkung bei drohender Kollision. Diese erfolgt in Form von Zusatzlenkmomenten, die vom Lenkhilfesystem aufgebracht werden. Es kommen weder zusätzliche Anzeigen oder Warn- und Hinweistöne, noch eine begleitende Bremsung zum Einsatz.

4.3. Ausweichempfehlung

Eine Ausweichassistenten in Form einer Ausweichempfehlung kommt dann zum Einsatz, wenn eine Kollision, die durch Ausweichen abgewendet werden kann, unmittelbar bevorsteht, aber der Fahrer keine Lenkreaktion zeigt. Aufgabe der Ausweichempfehlung ist es, den Fahrer auf die Gefahr aufmerksam zu machen und ihn zur (schnellen) Einleitung eines Ausweichmanövers zu motivieren. Auch eine Ausweichempfehlung kann mit unterschiedlicher „Intelligenz“ ausgestattet sein:

- Die Mindestanforderung an die maschinelle Wahrnehmung ist, dass diese ein relevantes Hindernis im Pfad des Ego-Fahrzeugs erkennen und somit eine akut drohende Kollision vorhersehen kann. Die einfachste Form einer Ausweichempfehlung könnte in solchen Fällen pauschal eingreifen.
- Für die Beherrschbarkeit des Systemeingriffs ist es von Vorteil, wenn die Leistungsfähigkeit der Umfelderkennung über diese Mindestanforderung hinausgeht. Die Ausweichempfehlung erfolgt nur dann, wenn die erfolgreiche Durchführung eines Ausweichmanövers überhaupt möglich erscheint (z.B. keine Kollision mit dem Gegenverkehr droht) und die günstigste Kollisionsvermeidungsstrategie darstellt.

Eine Ausweichempfehlung ist im Grunde eine Kollisionswarnung, die um einen reaktionsspezifischen Hinweis, also die Aufforderung zu einer konkreten Handlungsweise, ergänzt ist. Sie muss in der Lage sein, die Aufmerksamkeit des Fahrers zu erlangen, sowie die Empfehlung eines Lenkmanövers zu vermitteln.

Eine Anzeige ist am besten dafür geeignet, dem Fahrer die Fahrsituation und die empfohlene Lösungsstrategie explizit zu vermitteln. Dies kann beispielsweise durch symbolische Darstellung des Hindernisses und des empfohlenen Ausweichpfades erreicht werden. Es sind jedoch auch einfachere Varianten wie ein Lauflicht in die gewünschte Ausweichrichtung denkbar. Sinnvoll erscheint die optische Komponente nur, wenn die Anzeige in der Windschutzscheibe erfolgt und der Fahrer gleichzeitig das Verkehrsgeschehen verfolgen kann. Eine solche Anzeige ist jedoch schlecht dafür geeignet, einen unaufmerksamen Fahrer zu erreichen. Diese Funktion könnte ein Warnton besser ausüben, der unabhängig von der Kopfausrichtung wahrnehmbar ist. Ihm fällt es jedoch schwerer, die gewünschte Handlung zu vermitteln. Denkbar wäre ein räumliches Wandern weg vom Hindernis in die gewünschte Ausweichrichtung.

Um die Aufmerksamkeit des Fahrers außerhalb des visuellen Kanals zu erlangen bieten sich auch andere Möglichkeiten an. Sinnvoll erscheint eine Teilbremsung. Die vestibuläre Rückmeldung soll den Blick des Fahrers nach vorne lenken. Gleichzeitig wird die Situation entschärft: Einerseits wird mehr Zeit für Reaktion gewonnen, andererseits wird die kinetische Energie für den Fall einer Kollision reduziert, sodass zumindest die Unfallschwere gemindert wird. Nicht auszuschließen ist jedoch der unerwünschte Effekt, dass die Lenkwahrscheinlichkeit des Fahrers dadurch gemindert wird, dass er sich gegen das Trägheitsmoment am Lenkrad abstützt. Ebenfalls erscheint die Reduktion der maximalen Seitenführungskraft der Räder durch die Längsverzögerung problematisch, dem steht jedoch die Erhöhung der Radaufstandskräfte an der Vorderachse aufgrund des Trägheitsnicks entgegen.

Eine fahrzeugseitig ausgewogene Teilbremsung wiederum vermittelt keine Lenkaufforderung. Zur Bahnung der Lenkreaktion, sowohl Fahrer als auch Fahrzeug betreffend, könnte ein einseitig gewichteter Bremsruck erfolgen. Dank höherer Saliens kann er mit noch höherer Wahrscheinlichkeit die Aufmerksamkeit des Fahrers erlangen. Allerdings reagieren Fahrer auf systeminitiierte Verzögerung oft selbst mit starken Bremsengriffen. Weniger salient, aber dafür die erwünschte Handlung des Fahrers motorisch besser bahnend, ist ein Lenkradruck. Auch dieses Signal ist in der Lage, einen Fahrer bei Blickabwendung zu erreichen. Gerade bei fehlendem Situationsbewusstsein besteht jedoch die Gefahr, dass der Fahrer den Lenkradruck als externe Störung betrachtet und das Lenkrad reflexartig festhält. Bei beiden dieser Eingriffe sollte gewährleistet sein, dass die Auswirkung auf die Querführung durch diese Signale im Rahmen der Ausweichempfehlung nicht signifikant ausfällt: Die Herstellung des Querversatzes ist bei dieser Unterstützungsvariante alleinige Aufgabe des Fahrers und ein deutlicher Eingriff in die Querführung würde die Beherrschbarkeit mindern.

Auf Basis dieser Überlegungen wird als zu testendes Konzept für eine Ausweichempfehlung eine multimodale Kombination aus drei Komponenten festgelegt:

- Anzeige im HUD,
- Begleitende Teilbremsung,
- Einseitiger Brems- oder Lenkraddruck.

4.4. Ausweichautomatik

Eine Ausweichassistenten in Form einer Ausweichautomatik kommt dann zum Einsatz, wenn eine Kollision, die durch Ausweichen gerade noch verhindert werden kann, unmittelbar bevorsteht und der Fahrer keine Reaktion zeigt. Die Aufgabe des Systems ist die eigenständige Durchführung eines Ausweichmanövers. Auch ein solcher Notfalleingriff ist in unterschiedlichem Ausmaß möglich:

- Eine (in Relation) einfache Form der Ausweichautomatik muss mindestens dazu in der Lage sein, nicht nur eine drohende Kollision zu detektieren, sondern auch die Hindernisbreite und den zur Verfügung stehenden Manövrierraum zu bestimmen. Dann kann ein Lenkeingriff berechnet und ausgeführt werden, der die Kollision gerade so abwendet.
- Noch höhere Anforderungen an die maschinelle Wahrnehmung und Informationsverarbeitung bestehen für eine höher entwickelte Form der Ausweichautomatik. Hierfür muss das System die Fahrsituation vollständig überblicken, unter Prädiktion der Bewegungen aller umgebenden Objekte in Echtzeit den optimalen Ausweichpfad ermitteln und Quer- (und Längs-) -führung so regeln, dass das Fahrzeug diesem Ausweichpfad genau folgt – gegebenenfalls auch bei zusätzlichen oder widersprüchlichen Lenkeingaben des Fahrers. Eine solche Trajektorienführung kann auch die Funktion einer hoch entwickelten Ausweichunterstützung erfüllen, wenn das initiale Einleiten des Manövers dem Fahrer überlassen wird.

Zur Wahl des Aktors für die Querführungseingriffe gilt, was bereits für die Ausweichunterstützung angeführt wurde. Dabei kann der dort ausgeführten Argumentation gefolgt werden, nach der eine Lenkmomentüberlagerung am vielversprechendsten scheint. Im Kontext der Ausweichautomatik muss allerdings beachtet werden, dass das Manöver system- und nicht fahrerinitiiert ist. Der Fahrer ist gegenüber dem Fahrgeschehen möglicherweise unaufmerksam und wird somit durch den Systemeingriff überrascht. Dies lässt, wie auch im Falle der Ausweichempfehlung, befürchten, dass Fahrer das Lenkrad als Reaktion auf die Lenkmomente festhalten, weil sie eine externe Störung vermuten. Der Eingriff des Lenkhilfesystems würde somit kompensiert. Es erscheint im Rahmen einer Ausweichautomatik deshalb durchaus sinnvoll, den Querführungseingriff zumindest teilweise auf einer vom Lenkrad unabhängigen Ebene vorzunehmen. Die Möglichkeit hierzu bietet eine Überlagerungs- oder eine entkoppelte Lenkung, die allerdings mit Nachteilen bezüglich der Kontrollierbarkeit einhergehen.

Der Rückgriff auf einseitige Bremsung und aktives Wanken erscheint zumindest unterstützend sinnvoll, auch wenn deren Beitrag zu einem intensiven Querführungseingriff aufgrund ihrer maximalen Leistungsfähigkeit eher gering ist.

Begleitende Hinweisreize, zum Beispiel in Form von Anzeigen oder Tönen, erscheinen im Zusammenhang mit einer Ausweichautomatik sinnvoll. Diese können einerseits bei einem unaufmerksamen Fahrer eine Orientierungsreaktion auslösen und seine Aufmerksamkeit auf die Fahrsituation lenken. Zudem können sie dem Fahrer bewusst machen, dass ein intentionaler Systemeingriff stattfindet, um seinen Widerstand gegen den Lenkeingriff möglichst stark zu vermindern.

Auch eine automatisch eingeleitete Teilbremsung erscheint, wie im Falle der Ausweichempfehlung, als eine den Lenkeingriff begleitende Maßnahme sinnvoll. Zusätzlich zur dort aufgeführten Argumentation ist anzuführen, dass besonders bei einem nicht statischen Hindernis (das sich nicht nur relativ zum Fahrzeug, sondern auch relativ zur Umgebung bewegt) die Schaffung zusätzlicher Zeitreserven dringend geboten ist: Je länger die Entfaltung einer Situation beobachtet werden kann, umso zutreffender werden die Vorhersagen zu ihrem Ausgang. Es kommt einer reliablen Bestimmung des optimalen Ausweichpfades somit entgegen, den Eingriff unter Umständen so lange auf eine Längsverzögerung zu beschränken, bis der finale Kurs oder die finale Position des Hindernisses gut bestimmbar ist, um erst dann den Lenkeingriff auszuführen.

Als Konzept für eine Ausweichautomatik wurde im Rahmen dieser Arbeit ein System gewählt, das in mehreren Modalitäten mit dem Fahrer kommuniziert:

- Anzeige im HUD,
- begleitende Teilbremsung,
- adaptiver Lenkeingriff mittels Lenkmomentüberlagerung oder Lenkmomentüberlagerung in Kombination mit einseitig gewichteter Bremsung,
- ggfs. zusätzlicher Warnton.

5. Versuchsübergreifende Methodik

5.1. VIL-Fahrsimulator

Der VIL-Fahrsimulator stellt einen Hybriden aus Fahrsimulation und echtem Fahren dar. Dabei ist die für die Simulation der Fahrumgebung notwendige Technik in ein Fahrzeug verbaut, das auf einem abgesperrten Gelände bewegt wird. Der Fahrer steuert das Fahrzeug auf herkömmliche Weise, bekommt aber – zum Beispiel über eine Videobrille – eine teils oder gänzlich simulierte Fahrumgebung angezeigt. Die simulierte Fahrumgebung wird mit den zur Verfügung stehenden real befahrbaren Strecken auf solche Weise überlagert, dass jede zu befahrende Position in der simulierten Fahrumgebung auch eine befahrbare Entsprechung auf dem realen Gelände hat. Der dem Fahrer jeweils angezeigte Ausschnitt aus der Simulationsumgebung wird entsprechend seiner korrespondierenden realen Position und Blickausrichtung berechnet. Siehe Abbildung 7.

Der VIL-Fahrsimulator wurde ursprünglich von Bock et al. entwickelt (Bock et al., 2005; Bock, Maurer & Färber, 2007; Bock, 2008; Bock, 2009). Eine Geschichte des VIL-Fahrsimulators und seiner Meilensteine findet sich bei Berg und Färber (2015). Das IfA an der UniBw München verfügt über mehrere Aufbauten, bei denen unterschiedliche Konzepte für die Visualisierung der simulierten Fahrumgebung im VIL-Fahrsimulator umgesetzt sind. Die Verhaltensvalidität des VIL-Fahrsimulators als Untersuchungswerkzeug für unterschiedliche Aspekte des Fahrens wurde in mehreren Studien untersucht (z.B. Berg, Karl & Färber, 2011; Bock et al., 2007; Karl, Berg, Rüger & Färber, 2013; Rüger, Purucker, Schneider, Neukum & Färber, 2014). Darüber hinaus wurden Transferfunktionen zur Abschätzung des Fahrerverhaltens bei Realfahrt aus Daten einer Fahrt im VIL-Simulator abgeleitet (Rüger, 2016).

Im Rahmen der hier abgedruckten Arbeit kamen zwei Entwicklungsstände des VIL-Fahrsimulators zum Einsatz. Beide verwendeten eine iTraceRT-F200 von iMAR Navigation zur Bestimmung von Fahrzeugposition und -ausrichtung (INS durch Beschleunigungs- und Drehratensensoren, in Fusion mit einem GNSS-Modul). Eine auf dem Gelände eingerichtete Referenzstation stellte GNSS-Korrekturdaten bereit, die über UHF-Funk an das Fahrzeug übertragen wurden, um die Genauigkeit der Positionsmessungen zu erhöhen. Die verwendeten Entwicklungsstände des VIL-Fahrsimulators nutzten die NVIS ST50 Videobrille, um dem Fahrer die simulierte Fahrumgebung anzuzeigen. Die Brille bot ein Sichtfeld von 40° horizontal und 32° vertikal (NVIS Inc., 2009) und wurde im monoskopischen Modus betrieben. Position und Ausrichtung des Fahrerkopfes im Fahrzeug wurde über den optischen Tracker PST-55 von PS-Tech gemessen. Die Simulation wurde mithilfe der Virtual Test Drive (VTD) Software (Neumann-Cosel, Dupuis & Weiss, 2009) von Vires betrieben. Dabei kam VTD beim älteren eingesetzten Entwicklungsstand (vgl. Experiment 1) in der Version 1.1, beim neueren Entwicklungsstand (vgl. Experiment 3) in der Version 1.2 zum Einsatz. Der neuere Entwicklungsstand unterschied sich darüber

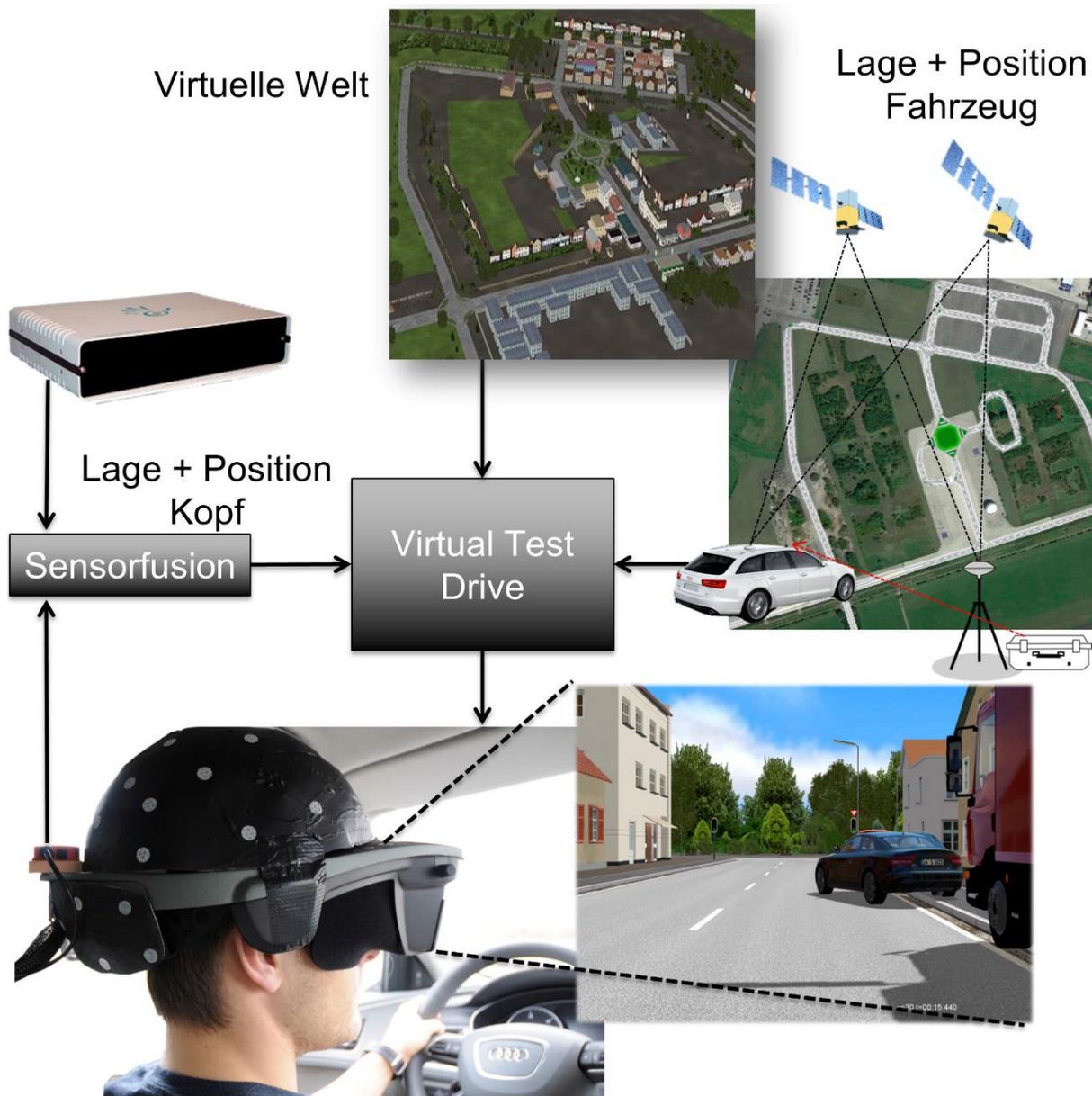


Abbildung 7: Funktionsprinzip des VIL (entnommen aus Rüger, 2015, S. 40)

hinaus dadurch vom älteren, dass zur Bestimmung von Position und Ausrichtung des Fahrerkopfes zusätzlich ein Inertialsensor vom Typ MTx der Firma XSens zum Einsatz kam. Durch die Fusionierung der beiden Sensoren und einen prädiktiven Ansatz (Extrapolation der Kopfbewegung um 50ms in die Zukunft), konnte die zeitliche Verzögerung zwischen einer Kopfbewegung und der Bewegungsumsetzung im berechneten Bild entscheidend reduziert werden (Berg, 2014).

5.2. CAPLOS

CAPLOS ist eine technische Vorrichtung, deren Zweck es ist, bei Fahrversuchen eine Hindernisattrappe von der Seite in die Fahrbahn einzubringen. Ziel bei der Entwicklung von CAPLOS war es,



Abbildung 8: CAPLOS im Einsatz

einen Prüfstand für Probandenstudien mit plötzlich auftretenden Hindernissen zu entwickeln (Schneider, Sieber & Färber, 2016). Um valide Fahrerreaktionen hervorzurufen, sollte die Hindernisattrappe für Probanden dabei möglichst wie ein echtes Hindernis aussehen (Augenscheinvalidität) und in gleicher Weise auf sie wirken (Verhaltensvalidität). Zugleich sollte die Hindernisattrappe bei einer etwaigen Kollision keinen Schaden verursachen. Zur Gewährleistung reliabler Messergebnisse bedarf es zudem einer Möglichkeit, das Einfahren der Hindernisattrappe in die Fahrbahn in hohem Maße reproduzierbar zu gestalten.

Zur Erfüllung dieser Ziele wurde eine Hindernisattrappe (s. Abbildung 8) eingesetzt, die in der Form und Größe der seitlichen Silhouette eines Fahrzeugs (Audi A6 Avant) im Maßstab 1:1 nachempfunden und mit einer hochauflösenden Fotografie einer ebensolchen Seitenansicht beklebt war. Die Attrappe war aus Schaumstoff und Styropor gefertigt. Zur weiteren Schadensminderung im Falle eines Zusammenstoßes war die Hindernisattrappe zweigeteilt: Der in die Fahrbahn ragende Teil der Attrappe war mit verborgenen Scharnieren am außerhalb der Fahrbahn ruhenden Teil befestigt und konnte beim Zusammenprall mit dem Versuchsfahrzeug wegklappen. Die Hindernisattrappe wurde über eine Schubstange pneumatisch angetrieben. Das Ausfahren der Hindernisattrappe wurde TTC-gesteuert ausgelöst, um die dem Fahrer zur Verfügung stehende Reaktionszeit konstant zu halten. Dazu stand CAPLOS mit dem Versuchsfahrzeug über ein WLAN-Funknetz in Verbindung. Die Position des Versuchsfahrzeugs wurde durch das im jeweiligen Versuchsträger verbaute INS/GNSS (mit GNSS-Korrektursignal) gemessen und mit der fest hinterlegten Position von CAPLOS und der aktuellen Ego-Fahrgeschwindigkeit verglichen. Sobald die zur Auslösung festgelegte TTC erstmalig unterschritten wurde, wurde CAPLOS per TCP-Botschaft aktiviert. Vom Sendezeitpunkt der TTC-Botschaft aus dauerte es etwa 350 ms bis zur ersten für den Fahrer sichtbaren Bewegung der Hindernisattrappe.

5.3. Coverstorys

Der Einsatz von Ausweichassistentz beschränkt sich in der Regel auf Szenarien, die den Fahrer überraschen. Um im Rahmen der durchgeführten Experimente möglichst valide Verhalten zu erzeugen, sollten auch die Versuchsteilnehmer unvorbereitet in die kritische Fahrsituation geraten. Es wurde daher als notwendig geachtet, die Probanden über die Hintergründe des Versuchs und seinen Ablauf anfangs im Unklaren zu lassen und gegebenenfalls sogar falsche Hintergründe und Begründungen in Form einer Legende („coverstory“) vorzutäuschen. Alle Probanden wurden am Ende des jeweiligen Versuchs vollständig über die wahren Versuchsinhalte aufgeklärt.

5.4. Versuchsfahrzeuge, Messtechnik, Versuchsgelände

In den durchgeführten Experimenten kamen zwei verschiedene Fahrzeuge als Ego-Fahrzeug und Träger der jeweils untersuchten Ausweichassistentz zum Einsatz. Die Versuchsfahrzeuge unterschieden sich darüber hinaus hinsichtlich der verwendeten Messtechnik.

Versuchsträger 1 (verwendet Experiment 1 und Experiment 4) war ein Audi A6 C7 Avant mit einem 150 kW starken 3,0 L Dieselmotor (TDI). Das Fahrzeug verfügte über Allradantrieb, eine elektromechanische Servolenkung und ein Automatikschaltgetriebe (Audi multitronic). Zur Bestimmung von Fahrzeugposition und -ausrichtung wurde das INS/GNSS-System iTraceRT-F200 der Firma iMAR Navigation in Kombination mit GNSS-Korrektursignalen verwendet. Die Übertragung der GNSS-Korrektursignale erfolgte über UHF-Funkmodems vom Typ Sateline-3asd der Firma Satel. Über ein CAN- und Flexray-Interface vom Typ VN7600 der Firma Vector und ein Signalrouting-Gateway vom Typ TTX Connexion der Firma TTTech Automotive, wurden Botschaften aus den CAN- und Flexray-Datenbussen des Fahrzeugs ausgelesen und in sie eingespeist. Versuchsträger 1 war darüber hinaus mit allen Komponenten des VIL-Fahrsimulators (siehe Kapitel 5.1) ausgerüstet.

Versuchsträger 2 (verwendet in Experiment 2 und Experiment 3) war ein Audi A7 Sportback mit einem 220 kW starken 3,0 L Benzinmotor (TFSI). Das Fahrzeug verfügte über Allradantrieb, eine elektromechanische Servolenkung mit zusätzlichem Überlagerungsgetriebe (Audi Dynamiklenkung) und ein Automatikschaltgetriebe (Audi S tronic). Zur Bestimmung von Fahrzeugposition und -ausrichtung kam eine Inertialmessplattform vom Typ iTraceRT-F400 der Firma iMAR Navigation in Kombination mit differentiell GNSS zum Einsatz. Die Übertragung der GNSS-Korrektursignale erfolgte über UHF-Funkmodems vom Typ Sateline-3asd der Firma Satel. Über ein CAN- und Flexray-Interface der Firma dSPACE und zwei Signalrouting-Gateways vom Typ TTX Connexion der Firma TTTech Automotive wurden Botschaften aus den CAN- und Flexray-Datenbussen des Fahrzeugs ausgelesen und in sie eingespeist. Versuchsträger 2 erlaubte zudem den Zugriff auf die serienmäßige, unter der Befestigung des Innenspiegels verbaute Frontkamera.



Abbildung 9: Versuchsgelände der UniBw München (© 2017 Google, nachträglich bearbeitet)

Als Referenzstation zur Berechnung der GNSS-Korrektursignale diente ein GNSS-Empfänger vom Typ ProPak V3 der Firma NovAtel, der neben dem Versuchsgelände aufgestellt war. In den Experimenten 1-3 wurden Korrektursignale von GPS- und Galileo-Satelliten im RTCA-Standard genutzt. In den Experimenten 3 und 4 wurden Korrektursignale von GPS-, Glonass- und Galileo-Satelliten im RTCMv3-Standard genutzt. Für die Aufzeichnung von Videos (Außensicht in Fahrtrichtung, Fahrerporträt, Fußraum und Pedalerie) wurden bei den Versuchsfahrten USB-Kameras vom Typ C910, C920 und C310 der Firma Logitech (sowie die serienmäßige Frontkamera in Versuchsträger 2) eingesetzt. Für die Aufzeichnung (und Manipulation) von CAN- und Flexray-Daten kamen in Experiment 1 die Software CANoe 8.0 der Firma Vector, in den Experimenten 2 bis 4 die Software ADTF 2.9 der Firma Elektrobit zum Einsatz.

Alle beschriebenen Versuche fanden auf dem für den öffentlichen Verkehr gesperrten Versuchsgelände der Universität der Bundeswehr München (UniBwM) statt (Abbildung 9).

6. Experiment 1 – Ausweichunterstützung

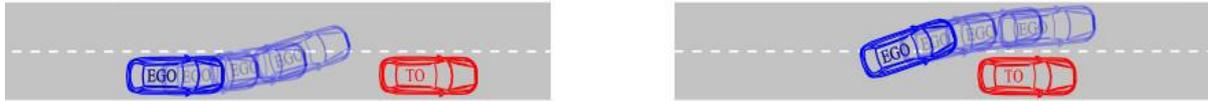


Abbildung 10: Aus- (links) und Einlenkvorgang (rechts) beim Ausweichen

6.1. Hintergrund und Fragestellung

Gegenstand von Experiment 1 war eine Ausweichunterstützung in Form einer Lenkmomentüberlagerung: ein Assistenzsystem, das während eines fahrerinitiierten Ausweichmanövers zusätzliche Lenkmomente aufbringt. Dabei wurde untersucht, welche Auswirkungen die Gestalt einer solchen Lenkhilfe hat und welche Anhaltspunkte sich bezüglich ihrer Wirksamkeit und Kontrollierbarkeit ergeben. Betrachtet wurden sowohl die Verlaufsform des Hilfslenkmoments, als auch seine Stärke. Die Fragestellung bezüglich der Hilfsmomentstärke war, ob Lenkmomente, die in ihrer Intensität über die bisher verbreitete Maximalstärke serienmäßiger Querführungseingriffe (zum Beispiel im Rahmen des Audi Lane Assist) hinausgehen, wirksamer, aber zugleich dennoch kontrollierbar sind. Im Zuge des Experiments wurde außerdem geprüft, in wie weit mit dem VIL-Fahrsimulator gewonnene Verhaltensdaten zu Systemeingriffen beim Notausweichen mit denen bei Realfahrt übereinstimmen. Ebenfalls untersucht wurde, wie unvorbereitete Fahrer ohne Assistenz auf eine plötzlich drohende Kollision im Längsverkehr reagieren. Im Rahmen des Versuchs unterstützte die Lenkhilfe sowohl das Auslenken des Fahrzeugs weg vom Hindernis, als auch das Einlenken in eine zur ursprünglichen Fahrtrichtung parallele Richtung (vgl. Abbildung 10). Im Fokus der Untersuchung stand dabei jedoch die Auslenkhilfe.

6.2. Vorstudien

In zwei Vorstudien mit jeweils 12 Usability-Experten wurden vorab zunächst eine passende Signaldauer für die Lenkunterstützung, und anschließend drei vielversprechende Signalverläufe für das Hilfslenkmoment ermittelt. Beide Vorversuche verwendeten einen mit Verkehrsleitkegeln abgesteckten Parcours (vgl. Abbildung 11), der einen dynamischen Fahrstreifenwechsel erforderte, der einem Ausweichmanöver ähnlich ist.

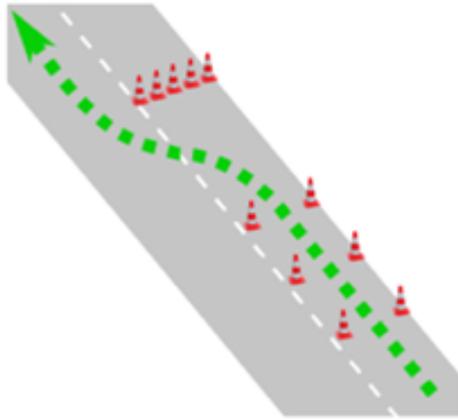


Abbildung 11: Versuchsanordnung (Vorstudie Ausweichunterstützung)

Im ersten Vorversuch wurde während der Aus- und der Einlenkvorgänge beim Fahrstreifenwechsel jeweils ein Zusatzlenkmoment aufgeschaltet, das in seiner Dauer von 100 bis 600 ms variiert wurde. Dabei bevorzugten die Experten eine Lenkunterstützung mit einer Dauer von etwa 250 bis 300 ms.

Für den zweiten Vorversuch wurden vorab 12 unterschiedliche mögliche Signalverläufe für das Zusatzlenkmoment festgelegt. Die Bewertung erfolgte in Paarvergleichen mit sukzessiver Eliminierung. Die drei Signalverläufe, die von den Experten am häufigsten als beste Signalform gewählt wurden, wurden im Hauptexperiment verwendet.

6.3. Stichprobe

An der Studie nahmen 49 Versuchspersonen teil, die über eine gültige Fahrerlaubnis der Klasse B verfügten und sich in einem fahrtüchtigen Zustand befanden. 24 Probanden („Fahranfänger“) waren höchstens 23 Jahre alt ($M = 20.3$, $SD = 1.5$) und verfügten über eine bisherige Gesamtfahrleistung von höchstens 50.000 km ($M = 26479$, $SD = 14425$), die anderen 25 Probanden („Fahrerfahrene“) waren mindestens 25 Jahre alt ($M = 34.2$, $SD = 11.0$) und verfügten über eine bisherige Gesamtfahrleistung von mindestens 100.000 km ($M = 302800$, $SD = 188116$). 12 Probanden jeder Gruppe waren weiblich, die jeweils verbleibenden männlich.

6.4. Methodik

6.4.1. Messaufbau

In diesem Experiment wurde Versuchsträger 1 (Audi A6 Avant) genutzt. Dabei kam teilweise der VIL-Fahrsimulator (älterer Entwicklungsstand ohne Prädiktion der Kopfbewegung) zum Einsatz. GNSS-Korrektursignale standen nur für GPS- und Galileo-Satelliten zur Verfügung.

Das Handlenkmoment und das Systemlenkmoment wurden mit einer Frequenz von 100 Hz mittels Vector CANoe 8.0 aufgezeichnet. Fahrzeugtrajektorie (Position, Ausrichtung, Geschwindigkeit), Lenkradwinkel, Lenkradwinkelgeschwindigkeit und Querbeschleunigung wurden mit einer Frequenz von 60 Hz mittels VTD 1.1 aufgezeichnet. Die Synchronisation der Messaufzeichnungen aus beiden Programmen erfolgte über das coordinated universal time (UTC) Signal des GNSS-Empfängers, das aus gleicher Quelle in beide Messdatenströme eingespeist wurde.

6.4.2. Systemgestaltung

Die Lenkhilfen wurden im Versuchsszenario automatisch zugeschaltet, sobald bestimmte Auslöse-Kriterien erfüllt waren. Diese waren für die Aufschaltung der Auslenkhilfe

- ein Lenkradwinkelbetrag von mindestens 3°
- und ein gleichgerichteter Lenkradwinkelgeschwindigkeitsbetrag von mindestens $30^\circ/\text{s}$,

sowie für die Aufschaltung der Einlenkhilfe

- eine mindestens 400 ms und maximal 1500 ms zuvor ausgelöste Auslenkhilfe
- und ein Lenkradwinkelbetrag größer 0° in die Gegenrichtung zur Auslenkhilfe
- mit einem Handlenkmoment von mindestens 2 Nm.

Nach jeder Auslösung der Auslenkhilfe wurde die Auslösung einer weiteren Auslenkhilfe aus Sicherheitsgründen für eine Dauer von 10 s unterbunden.

Die Ausprägung der Aus- (nach links) und Einlenkhilfe (nach rechts) bestimmte sich wie folgt:

- Durch die angeforderte maximale Stärke des Hilfsmoments (MS1 oder MS2) und
- durch den (in Abbildung 12 dargestellten) zeitlichen Verlauf in 7 Phasen mit den Zeiträumen:
 - Δt_1 für den linearen Anstieg der Momentstärke der Auslenkhilfe von null zum angeforderten Maximum, Δt_2 für die Aufrechterhaltung der angeforderten maximalen Momentstärke der Auslenkhilfe, Δt_3 für den linearen Abbau der Momentstärke der Auslenkhilfe vom angeforderten Maximum auf null,
 - Δt_4 für die Zeit ohne Hilfsmoment bis zum Einsetzen der Einlenkhilfe,
 - Δt_5 für den linearen Anstieg der Momentstärke der Einlenkhilfe von null zum angeforderten Maximum, Δt_6 für die Aufrechterhaltung der angeforderten maximalen Momentstärke der Einlenkhilfe, und Δt_7 für den linearen Abbau der Momentstärke der Einlenkhilfe vom angeforderten Maximum auf null.

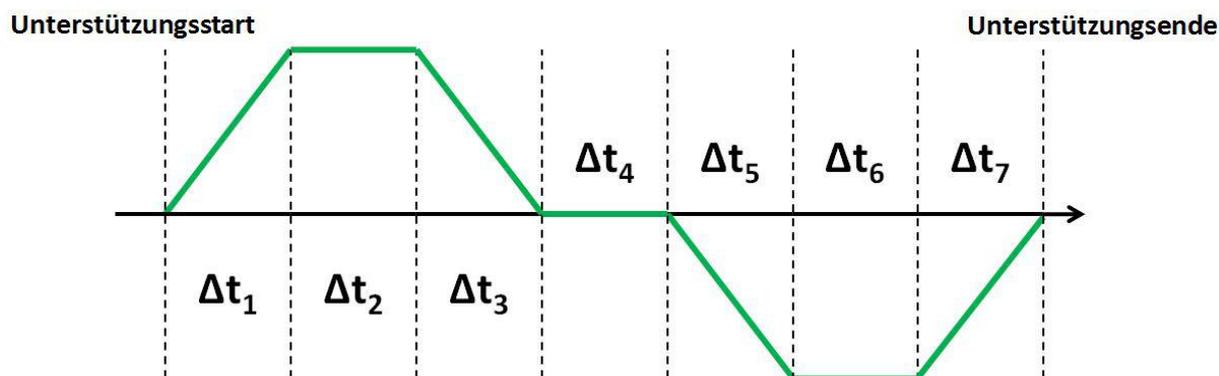


Abbildung 12: Zeitparameter der Lenkunterstützung in Experiment 1

Die Stärke des angeforderten Hilfsmoments betrug etwa 2-3 Nm bei einer nominell angeforderten Stärke von 1 (MS1), oder etwa 4-5 Nm bei einer nominell angeforderten Stärke von 2 (MS2). Die in Tabelle 3 dargestellten Ausprägungen der Aus- und Einlenkhilfen kamen im Versuch zur Anwendung.

Tabelle 3: Parametrierung der Lenkhilfen in Experiment 1, Δt in ms

Parametersatz	Stärke	Δt_1	Δt_2	Δt_3	Δt_4	Δt_5	Δt_6	Δt_7
Z1	MS1	0	300	0	var.	0	300	0
Z2	MS2	0	300	0	var.	0	300	0
Z3	MS2	0	300	0	400	0	300	0
A	MS2	0	250	0	var.	50	150	50
B	MS2	100	20	130	var.	50	150	50
C	MS2	0	0	300	var.	50	150	50

6.4.3. Versuchsszenarien und -strecken

6.4.3.1. Szenario „Folgefahrt“

Die Versuchsperson folgte im Ego-Fahrzeug, bei aktiviertem Tempomaten, in geringem Abstand (12,5 m mit einer Abweichung von höchstens 2 m) einem vorausfahrenden Fahrzeug (dunkelblauer Audi A3), das sich mit einer konstanten Geschwindigkeit von 50 kmh^{-1} auf einer ansonsten verkehrsfreien, geraden Fahrbahn mit einer Fahrstreifenbreite von 3,75 m und je einem Fahrstreifen pro Fahrtrichtung fortbewegte. Zu einem zufälligen Zeitpunkt verzögerte das vorausfahrende Fahrzeug überraschend und sehr stark (-13 ms^{-2}) in den Stillstand und blockierte dadurch den Ego-Fahrstreifen (vgl. Abbildung 13). Szenario „Folgefahrt“ wurde ausschließlich als Fahrt mit dem VIL-Simulator umgesetzt.

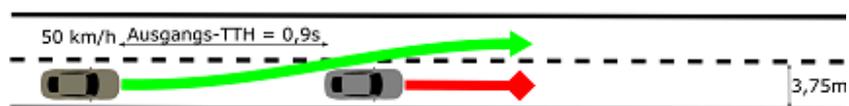


Abbildung 13: Szenario "Folgefahrt" (Experiment 1)

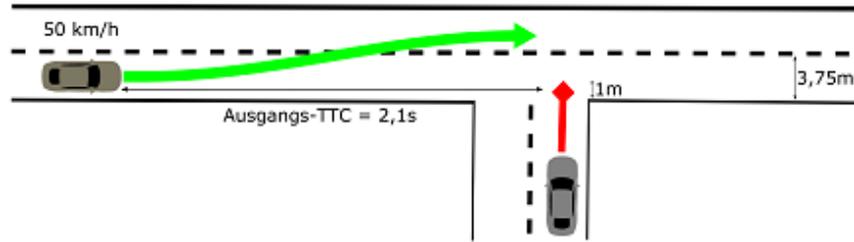


Abbildung 14: Szenario "Querverkehr" (Experiment 1)

6.4.3.2. Szenario „Querverkehr“

Die Versuchsperson fuhr im Ego-Fahrzeug auf einer verkehrsfreien, geraden Fahrbahn mit einer Fahrstreifenbreite von 3,75 m und je einem Fahrstreifen pro Fahrtrichtung, mit aktiviertem Tempomaten und einer Geschwindigkeit von 50 kmh^{-1} . An einer nicht vorfahrtberechtigten Einmündung von rechts näherte sich ein Fahrzeug (schwarzer Audi A6 bei normaler Fahrt, schwarzer Audi Q5 bei der Fahrt mit dem VIL-Fahrsimulator), das erst spät verzögerte und bei Stillstand etwa 1 m in den Ego-Fahrstreifen ragte und damit das Vorfahrtrecht verletzte (vgl. Abbildung 14). Die Sicht auf die Einmündung war in der realen Fahrumgebung durch einen Erdwall, in der virtuellen Fahrumgebung durch das eingeschränkte Sichtfeld der Fahrer begrenzt, sodass das querende Fahrzeug in beiden Bedingungen (bei der Fahrt mit VIL-Fahrsimulator davon ausgehend, dass der Fahrer nach vorne in Fahrtrichtung blickt) erst in einem Abstand von etwa 30 m zum Mündungspunkt entdeckt werden konnte. Das Szenario wurde sowohl als Realfahrt, als auch als Fahrt mit dem VIL-Fahrsimulator umgesetzt.

6.4.3.3. Szenario „Kurvenfahrt“

Die Versuchsperson durchfuhr im Ego-Fahrzeug, mit aktiviertem Tempomaten und einer Geschwindigkeit von 40 kmh^{-1} , eine Linkskurve von insgesamt etwa 90° (vgl. Abbildung 15). An der Position, an der die Lenkhilfe (in diesem Fall manuell durch den Versuchsleiter) aktiviert wurde, betrug der Kurvenradius etwa 35 m. Das Szenario wurde ausschließlich als Realfahrt umgesetzt.

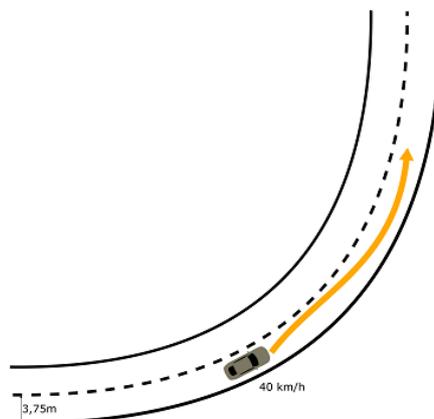


Abbildung 15: Szenario "Kurvenfahrt" (Experiment 1)

6.4.4. Versuchsdesign

6.4.4.1. Teilexperiment 1a (Verhalten uninstruierter Fahrer)

Versuchsteil 1a war explorativer Natur. Die verwendeten abhängigen Variablen (AV) sind in Tabelle 4 aufgeführt. Die Auswertung erfolgte deskriptiv.

Tabelle 4: Abhängige Variablen (AV) in Teilexperiment 1a

AV	[AV]	Operationalisierung
<i>Primärkollision</i>	-	Virtueller Zusammenstoß von Ego-Fahrzeug und vorausfahrendem Fahrzeug
<i>Hypothetische Lenkhilfe-Auslösung</i>	-	Lenkradwinkel $\geq 3^\circ$ & Lenkradwinkelgeschwindigkeit $\geq 30^\circ/s$
<i>Maximaler Lenkradwinkel</i>	1°	-

6.4.4.2. Teilexperiment 1b (Lenkhilfestärke, Fahrumgebung)

Versuchsteil 1b verwendete ein 2 (Lenkhilfestärke) x 2 (Fahrumgebung) Versuchsdesign mit Messwiederholung. In Tabelle 5 sind die verwendeten unabhängigen Variablen (UV) mit ihren jeweiligen Ausprägungen aufgeführt. Die Reihenfolge der Darbietung der Fahrumgebungen wurde zwischen den Versuchspersonen durch Alternieren balanciert. Die Reihenfolge der Darbietung der Lenkhilfestärken wurde zwischen den Versuchspersonen, sowie zwischen den Reihenfolgen der Fahrumgebungsdarbietung, durch Alternieren balanciert. Die in Teilexperiment 1b verwendeten AV sind in Tabelle 6 aufgeführt.

Tabelle 5: Unabhängige Variablen (UV) in Experiment 1b

UV	Ausprägungen	Erhebungsart
<i>Lenkhilfestärke</i>	<ul style="list-style-type: none"> MS1 (Lenkhilfe-Parametersatz Z1) MS2 (Lenkhilfe-Parametersatz Z2) 	Innersubjekt
<i>Fahrumgebung</i>	<ul style="list-style-type: none"> Real (Realfahrt) VIL (Fahrt mit dem VIL-Fahrsimulator) 	Innersubjekt

Auf Unterschiede zwischen den Lenkhilfestärken oder den Fahrumgebungen bezüglich der Anzahl der Primärkollisionen wurde jeweils mithilfe des Vierfelder- χ^2 -Tests (Bortz, 1990) geprüft. Auf Unterschiede zwischen den Lenkhilfestärken und den Fahrumgebungen bezüglich des maximalen Lenkradwinkels, der maximalen Lenkradwinkelgeschwindigkeit, der maximalen Gierrate, des maximalen Querversatzes und des mittleren Lenkhandmoments wurde jeweils mithilfe einer zweiseitigen zweifaktoriellen Varianzanalyse (analysis of variance, ANOVA) mit Messwiederholung (Marascuilo, 1988) geprüft. Tests auf Effekte der Lenkhilfestärke legten ein Signifikanzniveau von $\alpha = 5\%$ zu Grunde. Tests auf Effekte der Fahrumgebung hingegen legten ein Signifikanzniveau von $\alpha = 20\%$ zu Grunde (resultierend in einer a priori statistischen Power von mindestens 95% für Effekte ab einer Größe von

Cohen's $d_z = 0.43$)¹. Die Erhöhung von α wurde mit dem Ziel in Kauf genommen, aufgrund der wechselseitigen Beziehung (Bortz, 1977) β zu reduzieren, da in Bezug auf ein Postulieren der Gleichheit der Fahrumgebungen (und damit der Validität des VIL-Fahrsimulators als Prüfwerkzeug für Fahrer-Querführungsverhalten) das Vermeiden eines Typ-II-Fehlers (existierende Populations-Unterschiede nicht zu finden) als wichtiger erachtet wurde, als das Vermeiden eines Typ-I-Fehlers (zufällige Stichproben-Unterschiede auf die Population zu attribuieren). Die subjektive Gleichheit der Fahrumgebungen und die Symptome von Simulatorkrankheit wurden deskriptiv ausgewertet.

Tabelle 6: Abhängige Variablen (AV) in Telexperiment 1b

AV	[AV]	Operationalisierung
<i>Primärkollision</i>	-	(Virtueller) Zusammenstoß von Ego-Fahrzeug und quer einfahrendem Fahrzeug
<i>Maximaler Lenkradwinkel</i>	1°	Maximalbetrag des Lenkradwinkels nach links im Verlauf des Ausweichmanövers
<i>Maximale Lenkradwinkelgeschwindigkeit</i>	1°/s	Maximalbetrag der Lenkradwinkelgeschwindigkeit nach links im Verlauf des Ausweichmanövers
<i>Maximale Gierrate</i>	1rad/s	Maximalbetrag der Gierrate nach links während des Ausweichmanövers
<i>Maximaler Querversatz</i>	1m	Maximaler Querversatz nach links relativ zur Ausgangsposition (gemessen an Mitte Hinterachse)
<i>Mittleres Lenkhandmoment</i>	1Nm	Durchschnittlicher Lenkhandmomentbetrag im Verlauf des Ausweichmanövers
<i>Subjektive Gleichheit der Fahrumgebungen</i>	-	Anhang C: Fragebogen 1.3
<i>Symptome von Simulatorkrankheit</i>	-	SSQ mit Einzel-, Sub- und Gesamtskalen

6.4.4.3. Telexperiment 1c (Lenkhilfeverlauf)

Versuchsteil 1c verwendete ein einfaktorielles Design mit drei Ausprägungen der Lenkhilfe, wie in Tabelle 7 dargestellt. Jeder Proband erlebte jede Ausprägung der Lenkhilfe. Die Reihenfolge der Darbietung der Lenkhilfeausprägungen wurde zwischen den Versuchspersonen mithilfe der Methode des lateinischen Quadrats balanciert. Die in Telexperiment 1c verwendeten AV sind in Tabelle 8 aufgeführt.

Tabelle 7: Unabhängige Variablen (UV) in Telexperiment 1c

UV	Ausprägungen	Erhebungsart
<i>Lenkhilfeverlauf</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Lenkhilfe-Paramtersatz A • Lenkhilfe-Paramtersatz B • Lenkhilfe-Paramtersatz C 	Innersubjekt mit Messwiederholung

¹ Berechnet mit G-Power (Faul, Erdfelder, Lang & Buchner, 2007)

Tabelle 8: Abhängige Variablen (AV) in Telexperiment 1c

AV	[AV]	Operationalisierung
<i>Primärkollision</i>	-	Zusammenstoß von Ego-Fahrzeug und vorausfahrendem Fahrzeug
<i>Verlassen der Fahrbahn</i>	-	Überfahren der Fahrbahnbegrenzungslinien
<i>Maximaler Lenkradwinkel</i>	1°	Maximalbetrag des Lenkradwinkels nach links im Verlauf des Ausweichmanövers
<i>Maximale Lenkradwinkelgeschwindigkeit</i>	1°/s	Maximalbetrag der Lenkradwinkelgeschwindigkeit nach links im Verlauf des Ausweichmanövers
<i>Maximale Querbesehleunigung</i>	1 ms ⁻²	Maximalbetrag der Querbesehleunigung (nach rechts oder links) im Verlauf des Ausweichmanövers
<i>Mittlere Abweichung vom idealen Fahrverlauf</i>	1 m	Mittlere betragliche Querabweichung vom idealen Trajektorienverlauf von der Ego-Position bei Beginn des Lenkmanövers bis zur beobachteten Ego-Position auf Höhe des Hindernisses
<i>Gegenmomente</i>	-	Auftreten von Lenkhandmomenten, die einer gleichzeitig wirkenden Lenkhilfe entgegen gerichtet sind
<i>Subjektive Beurteilung der Lenkhilfe</i>	-	Anhang D: Fragebogen 1.4

Auf Unterschiede zwischen den Lenkhilfeverläufen bezüglich der Häufigkeit von Primärkollisionen, dem Verlassen der Fahrbahn und dem Auftreten von Gegenmomenten (jeweils über die zwei Fahrten je System gemittelt), sowie bezüglich der subjektiven Beurteilungen der Lenkhilfen wurde jeweils mithilfe des Friedman-Tests (Bortz, 1990) geprüft. Auf Unterschiede zwischen den Lenkhilfeverläufen bezüglich maximalem Lenkradwinkel, maximaler Lenkradwinkelgeschwindigkeit und mittlerer Abweichung vom idealen Fahrverlauf wurde jeweils mithilfe einer zweiseitigen einfaktoriellen ANOVA geprüft. Alle Tests legten ein Signifikanz-Niveau von $\alpha = 5\%$ zu Grunde.

6.4.4.4. Telexperiment 1d (Falschauslösung)

Versuchsteil 1d (Falschauslösung) verwendete ein einfaktorielles Design mit zwei Ausprägungen der Messreihenfolge, wie in Tabelle 9 dargestellt. Die Hälfte der Stichprobe erlebte Versuchsteil 1d als Erstkontakt mit der im Versuch verwendeten Art von Lenkunterstützung (im Anschluss an Versuchsteil 1a), die andere Hälfte der Stichprobe erlebte Versuchsteil 1d erst im Anschluss an die Versuchsteile 1b und 1c. Die in Telexperiment 1d verwendeten AV sind in Tabelle 10 aufgeführt. Die Auswertung erfolgte deskriptiv.

Tabelle 9: Unabhängige Variablen (UV) in Telexperiment 1d

UV	Ausprägungen	Erhebungsart
<i>Messreihenfolge</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Falschauslösung nach berechtigten Auslösungen • Falschauslösung vor berechtigten Auslösungen 	Intersubjekt

Tabelle 10: Abhängige Variablen (AV) in Telexperiment 1d

AV	[AV]	Operationalisierung
<i>Beeinträchtigung der Fahraufgabe</i>	-	Probandenurteil auf SBS
<i>Lenkradwinkelverlauf</i>	1°	-
<i>Lenkradwinkelausschläge</i>	1°	Maximale Lenkradwinkeldifferenz im Verlauf des Wirkzeitraums der Lenkhilfe
<i>Verlassen des Fahrstreifens</i>	-	Überfahren der Fahrstreifengrenze

6.4.5. Versuchsablauf

Zu Beginn des Versuchs füllten die Probanden einen Fragebogen zur Erfassung ihrer Fahrgewohnheiten und -erfahrung (Anhang A: Fragebogen 1.1) aus. Im Anschluss fanden die Fahrzeuggewöhnung (Sitz-, Spiegel- und Lenkrad-Einstellung und eine standardisierte Serie von Fahrmanövern zum Kennenlernen von Beschleunigungs-, Brems- und Lenkverhalten sowie der Fahrzeugabmessungen) und eine Einweisung in die Bedienung des Tempomaten statt. Zur Gewöhnung an den VIL-Simulator folgten je eine Fahrt in simulierter Umgebung auf leerer Straße und eine Fahrt mit virtuellem Verkehr, der sich regelkonform verhielt. Die Probanden erhielten eingangs keine näheren Informationen zum Versuchsinhalt.

Anschließend folgte Versuchsteil 1a (Verhalten uninstruierter Fahrer). Dabei wurden Probanden bei deaktivierter Lenkhilfe mit dem Szenario „Folgefahrt“ konfrontiert und füllten danach einen Fragebogen zur Bewertung der erlebten Fahrsituation und der Angemessenheit ihrer Fahrreaktion (Anhang B: Fragebogen 1.2) aus. Es folgten eine teilweise Aufklärung über den Versuchsinhalt und die Instruktion, im weiteren Verlauf des Versuchs auf auftretende Hindernisse mit einem ungebremsten Ausweichen nach links zu reagieren. Um zu prüfen, ob die Versuchsperson die Instruktion verstanden hatte, folgte eine erneute Konfrontation mit Szenario „Folgefahrt“ ohne Lenkhilfe.

Für die Hälfte der Probanden folgte dann Versuchsteil 1d (siehe unten).

In Versuchsteil 1b (Lenkhilfestärke, Testumgebung) folgten sieben Fahrten, von denen jeweils die ersten vier in der einen Testumgebung (Realfahrt oder VIL-Fahrsimulator), die letzten drei in der jeweils anderen stattfanden. Bei den Fahrten eins, vier, sechs und sieben wurden die Probanden mit dem Szenario „Querverkehr“ konfrontiert. Die Fahrten zwei, drei und fünf erfolgten auf der gleichen Strecke,

aber ohne den vorfahrtsmissachtenden Querverkehr. Die Lenkhilfe war aktiviert und wurde bei Erfüllung der Auslösekriterien zugeschaltet. Dabei kamen die Lenkhilfeverläufe LH-Z1 (MS1) und LH-Z2 (MS2) zum Einsatz: die eine bei den Fahrten eins und sechs, die jeweils andere bei den Fahrten vier und sieben. Am Ende der Fahrten füllten die Probanden einen Fragebogen zur empfundenen Äquivalenz des Szenarios in den beiden Testumgebungen (Anhang C: Fragebogen 1.3) aus.

In Versuchsteil 1c (Lenkhilfeverlauf) wurden die Probanden sechsmal mit dem Szenario „Folgefahrt“ konfrontiert. Die Lenkhilfe war aktiviert und wurde bei Erfüllung der Auslöse-Kriterien zugeschaltet. Dabei erfolgten die Fahrten eins und sechs jeweils mit einer der drei Lenkhilfeausprägungen A („Rechteck“), B („Trapez“) oder C („Dreieck“), die Fahrten zwei und drei mit einer der anderen, und Fahrten vier und fünf schließlich mit der verbleibenden. Nach den Fahrten eins, drei und fünf beurteilten die Probanden die jeweils gerade erlebte Lenkhilfe (Anhang D: Fragebogen 1.4). Nach den Fahrten zwei, vier und sechs wurden die zwei jeweils zuletzt erlebten Lenkhilfen miteinander verglichen (Anhang E: Fragebogen 1.5). Am Ende von Versuchsteil 1c machten die Probanden Angaben zum Ausmaß der aufgetretenen Symptome von Simulatorkrankheit.

Im Anschluss erfolgte (für die Hälfte der Probanden, s.o.) Versuchsteil 1d (Falschauslösung). Darin wurden Probanden mit dem Szenario „Kurvenfahrt“ konfrontiert. Dabei kam die Lenkhilfe der Ausprägung Z3 zur Anwendung. Am Ende der Fahrt machten Probanden Angaben zu ihrem Erleben der Falschauslösung (Anhang F: Fragebogen 1.6).

6.5. Ergebnisse

6.5.1. *Teilexperiment 1a – Verhalten uninstruierter Fahrer*

Beim ersten Erleben des Szenarios „Folgefahrt“ kollidierten 47 von 48 Probanden mit dem virtuellen Hindernis. Nur ein Proband konnte die Kollision abwenden. Dies geschah durch eine schnelle und intensive Bremsreaktion.

Bei 2 von 48 Probanden wurden deutliche Ausweichversuche mit maximalen Lenkradwinkeln von mehr als 100° registriert. Bei den verbleibenden 46 Probanden wurden jeweils weniger als 15° als maximaler Lenkradwinkel gemessen. Die für das Experiment festgelegten Auslösekriterien der Lenkunterstützung waren bei 10 von 48 Probanden erfüllt.

6.5.2. *Teilexperiment 1b – Lenkhilfestärke, Testumgebung*

Die Fahrten aller Probanden im Szenario „Querverkehr“ verliefen kollisionsfrei, mit einer Ausnahme: Bei einem Probanden kam es bei der Fahrt im VIL-Simulator mit schwachem Hilfsmoment (MS1) zu einer Kollision mit dem virtuellen Hindernis. Dabei wurde eine, im Vergleich zu den anderen Probanden und den anderen Fahrten dieses Probanden, sehr hohe Reaktionszeit beobachtet.

6.5.2.1. Lenkhilfestärke

Das Wirken der Lenkunterstützung führte zu einer Lenkmomententlastung. Dabei war das Lenkmoment des Fahrers im Wirkungszeitraum der Hilfsmomente betragslich reduziert. Der Rückgang spiegelt wider, dass der vom Fahrer aufzubringende Kraftaufwand im Zeitraum der Unterstützung geringer war. Abbildung 16 zeigt beispielhaft einen typischen Lenkhandmomentverlauf. Dabei erscheint das angeforderte Hilfsmoment geradezu aus dem Lenkhandmomentverlauf „ausgeschnitten“. Ein Unterschied im mittleren betragslichen Lenkmoment des Fahrers gibt daher Aufschluss über das Ausmaß der Entlastung. Das mittlere Lenkhandmoment (Abbildung 17) war statistisch signifikant höher für Hilfsmomentstärke MS1, $F(1, 41) = 37.95$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .48$, sowie für die Fahrumgebung VIL, $F(1, 41) = 4.67$, $p = .04$, $\eta_p^2 = .10$. Ein Interaktionseffekt wurde nicht beobachtet, $F(1, 41) = 0.67$, $p = .42$.

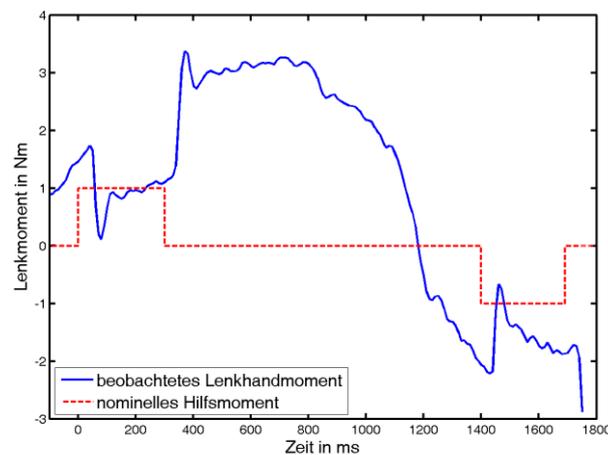


Abbildung 16: Typischer Lenkmomentverlauf eines Fahrers beim Ausweichen mit Entlastung durch Hilfsmomente der Ausweichunterstützung

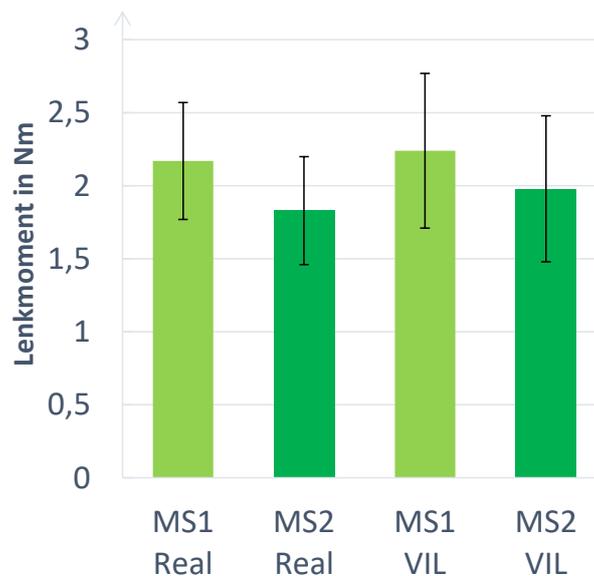


Abbildung 17: Mittleres betragsliches Lenkmoment des Fahrers beim Ausweichvorgang mit Ausweichunterstützung. Durchschnittswerte für Hilfsmomentstärke 1 (MS1) und 2 (MS2) jeweils bei Realfahrt (Real) und VIL-Simulation (VIL), Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung.

Der maximale Lenkradwinkel (Abbildung 18) war statistisch signifikanter höher für die Hilfsmomentstärke MS2, $F(1, 41) = 6.34$, $p = .02$, $\eta_p^2 = .13$, sowie für die Fahrumgebung Realfahrt, $F(1, 41) = 49.20$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .55$). Ein Interaktionseffekt wurde nicht beobachtet, $F(1, 41) = 0.10$, $p = .75$).

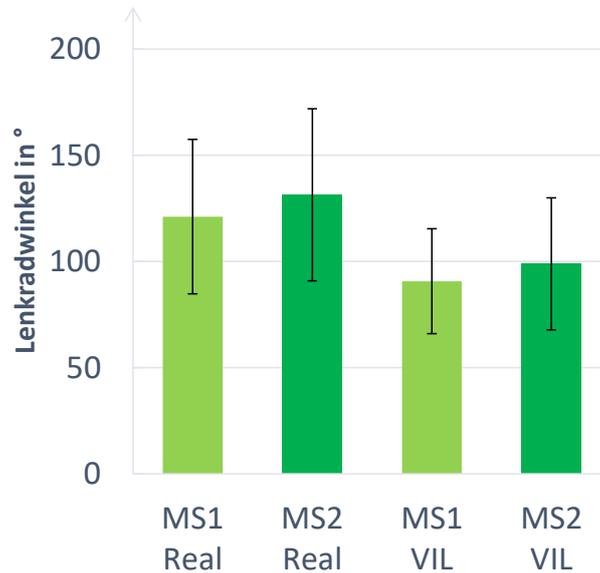


Abbildung 18: Maximaler Lenkradwinkel nach links beim Ausweichvorgang mit Ausweichunterstützung. Durchschnittswerte für Hilfsmomentstärke 1 (MS1) und 2 (MS2) jeweils bei Realfahrt (Real) und VIL-Simulation (VIL), Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung.

Die maximale Lenkradwinkelgeschwindigkeit (Abbildung 19) war statistisch signifikant höher für die Hilfsmomentstärke MS2, $F(1, 41) = 5.25$, $p = .03$, $\eta_p^2 = .11$, sowie für die Fahrumgebung Realfahrt, $F(1, 41) = 35.23$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .46$. Eine Interaktion wurde nicht beobachtet, $F(1, 41) = 0.02$, $p = .90$.

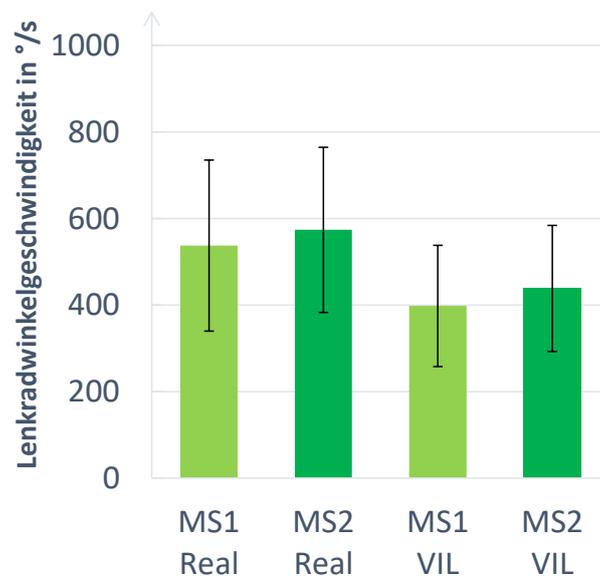


Abbildung 19: Maximale Lenkradwinkelgeschwindigkeit nach links beim Ausweichvorgang mit Ausweichunterstützung. Durchschnittswerte für Hilfsmomentstärke 1 (MS1) und 2 (MS2) jeweils bei Realfahrt (Real) und VIL-Simulation (VIL), Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung.

Die maximale Gierrate (Abbildung 20) war statistisch signifikant höher für die Hilfsmomentstärke MS2, $F(1, 41) = 4.20$, $p = .05$, $\eta_p^2 = .09$), sowie für die Fahrumgebung Realfahrt, $F(1, 41) = 42.37$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .51$.

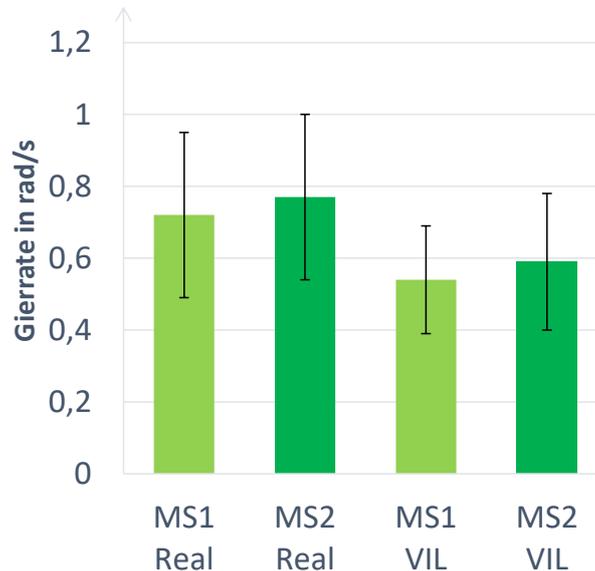


Abbildung 20: Maximale Gierrate nach links beim Ausweichvorgang mit Ausweichunterstützung. Durchschnittswerte für Hilfsmomentstärke 1 (MS1) und 2 (MS2) jeweils bei Realfahrt (Real) und VIL-Simulation (VIL), Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung.

Der maximal hergestellte Querversatz (Abbildung 21) wurde weder von der Hilfsmomentstärke, $F(1, 41) = 3.57$, $p = .07$, noch von der Fahrumgebung, $F(1, 41) = 0.18$, $p = .67$, oder der Interaktion der beiden UV, $F(1, 41) = 0.05$, $p = .82$, statistisch signifikant beeinflusst.

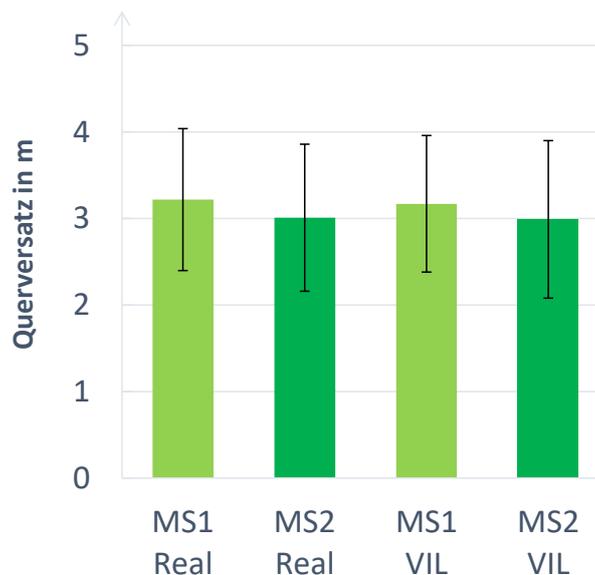


Abbildung 21: Maximaler Querversatz zur Ausgangsposition nach links beim Ausweichvorgang mit Ausweichunterstützung. Durchschnittswerte für Hilfsmomentstärke 1 (MS1) und 2 (MS2) jeweils bei Realfahrt (Real) und VIL-Simulation (VIL), Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung.

6.5.2.2. Validität des VIL-Fahrsimulators als Fahrumgebung für Querführungsverhalten

Zur Prüfung der augenscheinlichen Vergleichbarkeit der Fahrumgebungen Realfahrt und VIL-Fahrsimulator wurden die Probanden gebeten, anzugeben, in welcher Fahrumgebungen sie die kritische Situation früher bemerkten, besser auf die kritische Situation reagierten, die kritische Situation schwerer zu meistern fanden, und die Situation als kritischer wahrnahmen. Dies geschah auf einer 5-stufigen Skala von „bei der normalen Fahrt“, über „eher bei der normalen Fahrt“, „weder noch“, „eher bei der Fahrt mit VIL“, zu „bei der Fahrt mit VIL“.

Tabelle 11 zeigt die relativen Häufigkeiten jeder Antwort für alle vier Items. Die Mehrzahl der Probanden gab an, die kritische Situation bei den Realfahrten früher bemerkt, und auf sie dort auch besser reagiert zu haben. Die Mehrzahl der Probanden bewertete die Fahrten mit dem VIL-Fahrsimulator als schwieriger zu meistern. Für eine höhere Kritikalität in einer der beiden Fahrmodalitäten fand sich keine Mehrheit. Insgesamt stützt weniger als ein Viertel aller Bewertungen die These, dass die kritische Situation bei den Realfahrten und den Fahrten mit dem VIL-Fahrsimulator als gleichwertig erlebt wurde.

Tabelle 11: Fahrerurteile zur Äquivalenz des Szenarios „Querverkehr“ bei Realfahrt und der Fahrt mit dem VIL-Fahrsimulator. Unterstrichene Werte markieren den Median.

Situation...	bei Real- fahrt	eher bei Re- alfahrt	weder noch	eher bei VIL-Sim.	bei VIL-Si- mulation
<i>...früher bemerkt</i>	25 %	<u>35 %</u>	17 %	13 %	10 %
<i>...besser reagiert</i>	19 %	<u>42 %</u>	23 %	15 %	2 %
<i>...schwieriger zu meistern</i>	6 %	6 %	21 %	<u>44 %</u>	23 %
<i>...als kritischer empfunden</i>	19 %	21 %	<u>13 %</u>	31 %	17 %

Die Teilnehmer lenkten im Mittel bei den Realfahrten früher. Der Reaktionspunkt (Lenkbeginn für das Ausweichmanöver) lag

- bei den Realfahrten bei durchschnittlich 22,4 m (SD=2,9 m),
- bei den Fahrten mit dem VIL-Fahrsimulator bei durchschnittlich 18,6 m (SD=2,9 m) vor dem Hindernis.

Abbildung 22 verdeutlicht anhand der durchschnittlichen Lenkhandmomentverläufe, dass das Lenkverhalten bei den Fahrten mit VIL-Fahrsimulator zwar schwächer ausfällt, aber im Verlauf weitgehend identisch scheint.

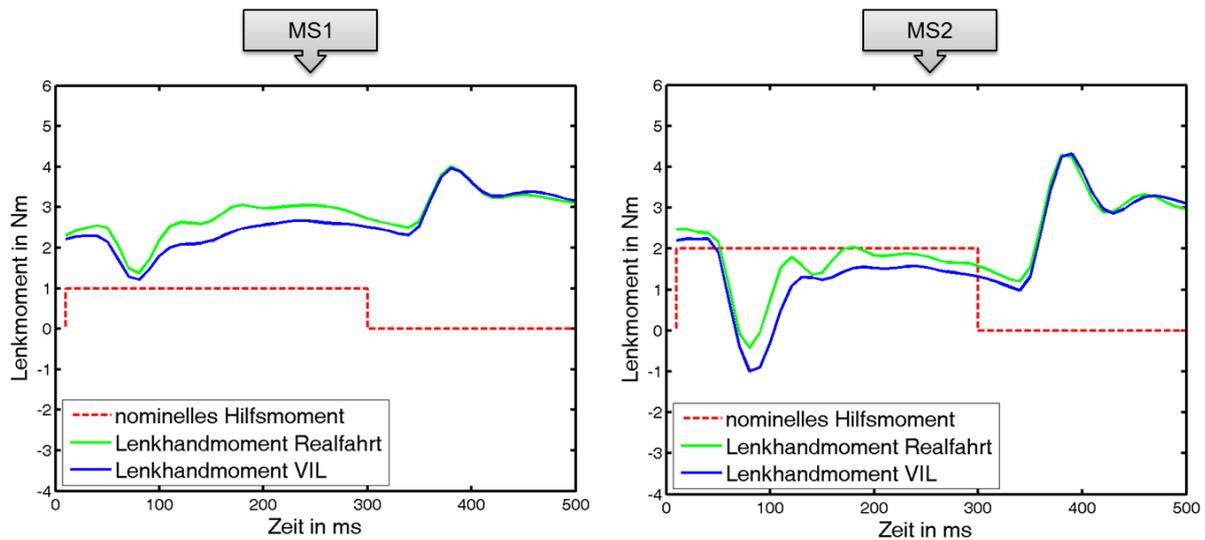


Abbildung 22: Durchschnittlicher Lenkmomentverlauf für Hilfsmomentstärke 1 (links) und 2 (rechts) beim Ausweichen mit Ausweichunterstützung, jeweils nach Fahrumgebung (Realfahrt oder VIL-Simulation)

Im SSQ (Kennedy et al., 1993) geben Probanden bezüglich verschiedener Symptome an, ob diese

- überhaupt nicht (0),
- etwas (1),
- deutlich (2), oder
- sehr stark (3) vorhanden sind.

Tabelle 12 führt für alle Symptome der Simulatorkrankheit die dazugehörigen beobachteten Mittelwerte und Standardabweichungen² an. Die Erhebung der Symptome erfolgte am Ende des Versuchs nach fast anderthalb Stunden im Fahrzeug, davon über 50 Minuten in der virtuellen Fahrumgebung des VIL-Fahrsimulators. Nennenswert sind die (im Durchschnitt „etwas vorhanden[en]“) Symptome

- allgemeines Unwohlsein, das möglicherweise allein auf die lange Dauer des Versuchs zurückgeführt werden kann,
- Druckgefühl im Kopf, das teils durch den schweren Helm erklärt werden kann, und
- überanstrengte Augen, die durch die direkt vor den Augen gelagerte Bildanzeige hervorgerufen werden.

² Dieses Vorgehen wurde aus Gründen der Vergleichbarkeit mit den Angaben aus Studien, in denen der SSQ zur Anwendung kam, gewählt, obwohl die Aussagekraft von Mittelwert und Standardabweichung für den Datentyp einer 4-stufigen Ordinalskala zweifelhaft erscheint.

Tabelle 12: Durchschnittliche Symptome von Simulatorkrankheit am Ende von Experiment 1

Symptom	Mittelwert (M)	Standardabweichung (SD)
<i>Allgemeines Unwohlsein</i>	1,00	0,88
<i>Müdigkeit</i>	0,27	0,45
<i>Kopfschmerzen</i>	0,54	0,71
<i>Überanstrengte Augen</i>	0,83	0,72
<i>Schwierigkeiten beim Scharfsehen</i>	0,63	0,64
<i>Erhöhter Speichelfluss</i>	0,10	0,37
<i>Schwitzen</i>	0,58	0,74
<i>Übelkeit</i>	0,65	0,91
<i>Konzentrationsschwierigkeiten</i>	0,69	0,72
<i>Druckgefühl im Kopf</i>	1,00	0,99
<i>Getrübtes Sehen</i>	0,46	0,54
<i>Schwindel bei geöffneten Augen</i>	0,34	0,60
<i>Schwindel bei geschlossenen Augen</i>	0,19	0,53
<i>Drehschwindel</i>	0,29	0,54
<i>Wahrnehmung des Magens</i>	0,60	0,74
<i>Aufstoßen</i>	0,17	0,43

6.5.3. Teilexperiment 1c – Hilfsmomentverlauf

6.5.3.1. Objektive Daten

In Versuchsteil 1c folgten die Probanden bei einer Fahrt mit dem VIL-Fahrsimulator einem vorausfahrenden Fahrzeug, das abrupt abbremsste (Szenario „Folgefahrt“). Ausweichmanöver wurden dabei mit den Lenkhilfe-Parametersätzen A („Rechteck“), B („Trapez“) oder C („Dreieck“) unterstützt.

Abbildung 23 zeigt die relative Häufigkeit verhinderter Kollisionen für die drei untersuchten Hilfsmomentverläufe. Abbildung 24 zeigt den Prozentsatz der Manöver mit verhinderter Kollision, bei denen die Fahrbahn verlassen wurde. Es wurden keine statistisch signifikanten Effekte des Hilfsmomentverlaufs auf die Häufigkeit der Kollisionen, $\chi^2(2, N=49) = 3.80, p = .15$, oder die Häufigkeit des Verlassens der Fahrbahn, $\chi^2(2, N=49) = 0.95, p = .62$, beobachtet. Hilfsmomentverlauf B statistisch signifikant am häufigsten zu erwünschten Manövern (keine Kollision, kein Verlassen der Fahrbahn; s. Abbildung 25), $\chi^2(2, N=49) = 8.90, p = .01$.



Abbildung 23: Relative Häufigkeit vermiedener Kollisionen beim Ausweichen mit Ausweichunterstützung (AWÜ) für Hilfsmomentverlauf A („Rechteck“), B („Trapez“) und C („Dreieck“)

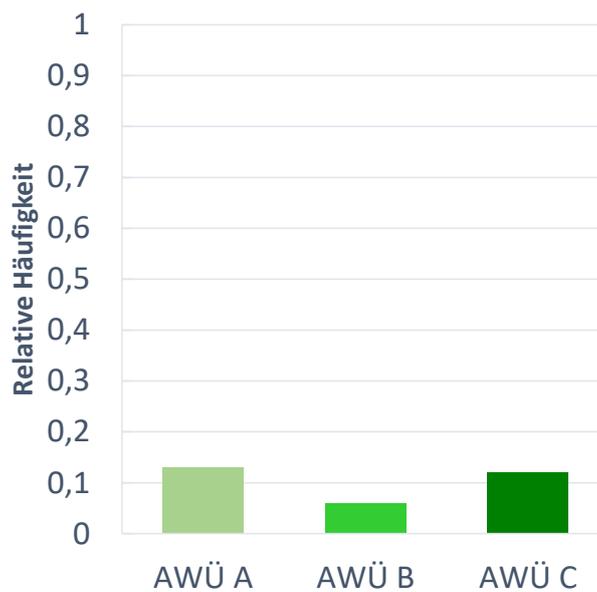


Abbildung 24: Relative Häufigkeit des Verlassens der Fahrbahn beim Ausweichen mit Ausweichunterstützung (AWÜ) für Hilfsmomentverlauf A („Rechteck“), B („Trapez“) und C („Dreieck“)

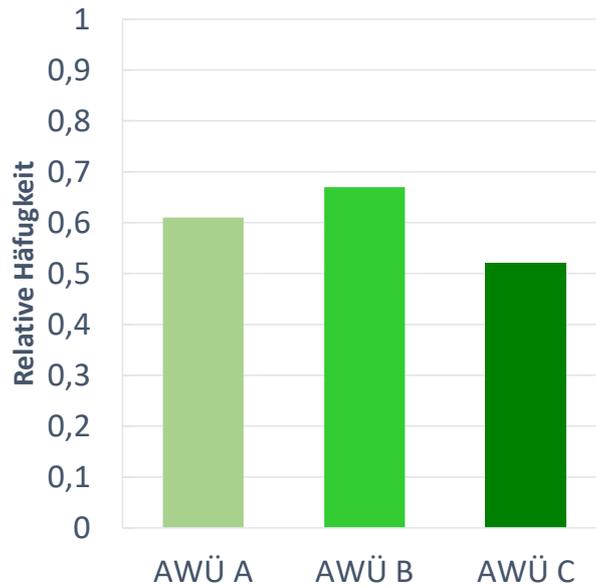


Abbildung 25: Relative Häufigkeit erwünschter Manöver (ohne Kollision oder Verlassen der Fahrbahn) beim Ausweichen mit Ausweichunterstützung (AWÜ) für Hilfsmomentverlauf A („Rechteck“), B („Trapez“) und C („Dreieck“)

Der beobachtete maximale Lenkradwinkel nach links ist in Abbildung 26 dargestellt. Der Hilfsmomentverlauf hatte keinen statistisch signifikanten Effekt, $F(2, 47) = 2.67$, $p = 0.74$.

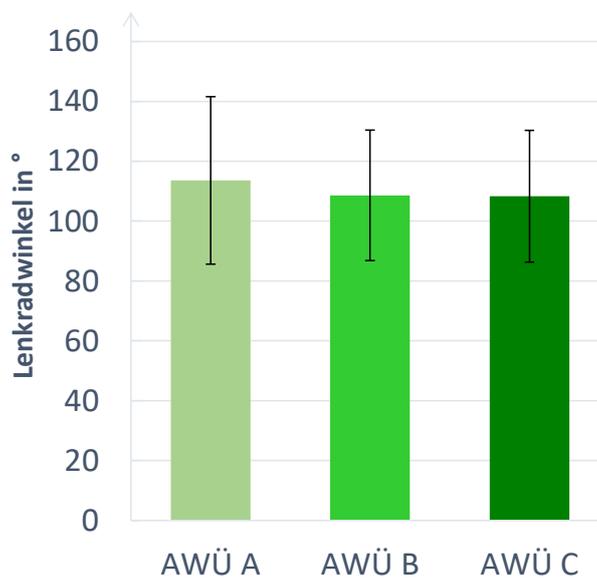


Abbildung 26: Maximaler Lenkradwinkel nach links beim Ausweichvorgang mit Ausweichunterstützung (AWÜ) für Hilfsmomentverlauf A („Rechteck“), B („Trapez“) und C („Dreieck“). Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung.

Die beobachtete maximale Lenkradwinkelgeschwindigkeit nach links ist in Abbildung 27 dargestellt. Der Hilfsmomentverlauf hatte keinen statistisch signifikanten Effekt, $F(2, 47) = 0.32$, $p = .73$.

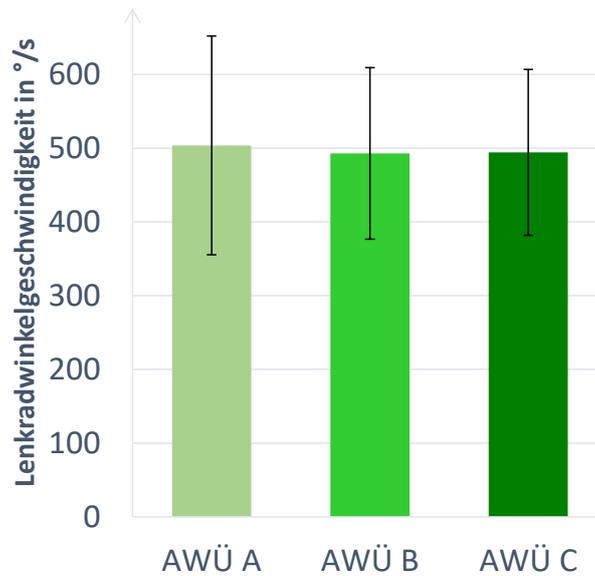


Abbildung 27: Maximale Lenkradwinkelgeschwindigkeit nach links beim Ausweichen mit Ausweichunterstützung (AWÜ) für Hilfsmomentverlauf A („Rechteck“), B („Trapez“) und C („Dreieck“). Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung.

Abbildung 28 zeigt die mittlere betragliche Abweichung von der idealen Trajektorie, projiziert von der Fahrzeugposition bei Beginn des Lenkmanövers zur gemessenen Fahrzeugposition beim Passieren des Hindernisses. Es wurde jedoch ein statistisch signifikanter Effekt des Hilfsmomentverlaufs beobachtet, $F(2, 47) = 4.72$, $p = .01$: Die Abweichung von der Idealtrajektorie war für Hilfsmomentverlauf B („Trapez“) statistisch signifikant ($p = .001$) geringer, als für Hilfsmomentverlauf C („Dreieck“).

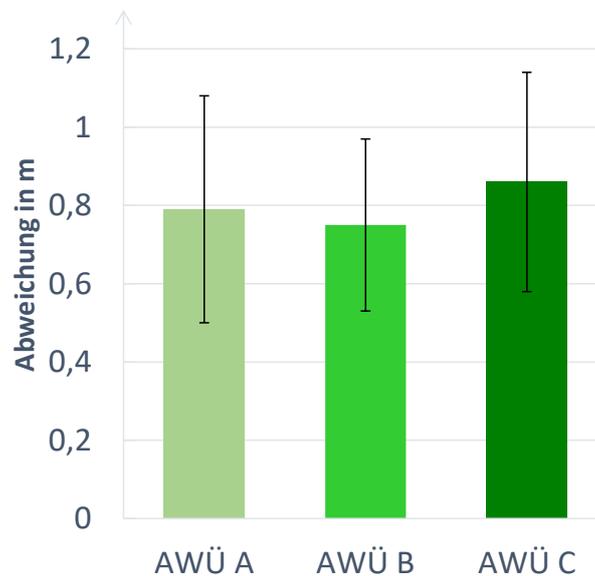


Abbildung 28: Mittlere betragliche Abweichung von der Idealtrajektorie beim Ausweichen mit Ausweichunterstützung (AWÜ) für Hilfsmomentverlauf A („Rechteck“), B („Trapez“) und C („Dreieck“). Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung.

Die relative Häufigkeit des Auftretens eines Lenkmoments des Fahrers, das einem wirkenden Hilfsmoment entgegen gerichtet ist, ist in Abbildung 29 dargestellt. Bei Hilfsmomentverlauf B („Trapez“) traten in keinem Fall Gegenmomente auf.



Abbildung 29: Relative Häufigkeit von Gegenmomenten beim Ausweichen mit Ausweichunterstützung (AWÜ) für Hilfsmomentverlauf A („Rechteck“), B („Trapez“) und C („Dreieck“)

6.5.3.2. Subjektive Daten

Tabellen 13-20 zeigen die Verteilungen der Urteile für die einzelnen Items. Die Unterschiede in den Bewertungen der verschiedenen Hilfsmomentverläufe waren für keines der Items „hilfreich“, $\chi^2(2, N=44) = 1.84, p = .40$, „nützlich“, $\chi^2(2, N=46) = 1.73, p = .42$, „deutlich spürbar“, $\chi^2(2, N=47) = 2.03, p = .36$, „leicht übersteuerbar“, $\chi^2(2, N=48) = 2.00, p = .37$, „befreiend“, $\chi^2(2, N=44) = 2.11, p = .35$, „entlastend“, $\chi^2(2, N=44) = 1.48, p = .48$, „unterstützend“, $\chi^2(2, N=44) = 4.30, p = .12$, oder „erhöht Sicherheit“, $\chi^2(2, N=48) = 0.91, p = .64$ statistisch signifikant.

Tabelle 13: Probandenurteile zur Bewertung der Ausweichunterstützung bezüglich des Items "hilfreich" für Hilfsmomentverläufe A („Rechteck“), B („Trapez“) und C („Dreieck“). Unterstrichene Werte markieren den Median. Die Spalte Rang ordnet die Hilfsmomentverläufe absteigend nach ihrer jeweiligen Rangsumme im Friedman-Test

	störend	eher störend	weder noch	eher hilfreich	hilfreich	Rang
A	2 %	9 %	21 %	<u>43 %</u>	26 %	3
B	0 %	4 %	13 %	<u>57 %</u>	26 %	1
C	0 %	16 %	23 %	<u>30 %</u>	32 %	2

Tabelle 14: Probandenurteile zur Bewertung der Ausweichunterstützung bezüglich des Items "nützlich" für Hilfsmomentverläufe A („Rechteck“), B („Trapez“) und C („Dreieck“). Unterstrichene Werte markieren den Median. Die Spalte Rang ordnet die Hilfsmomentverläufe absteigend nach ihrer jeweiligen Rangsumme im Friedman-Test

	nutzlos	eher nutzlos	weder noch	eher nützlich	nützlich	Rang
A	2 %	10 %	17 %	<u>42 %</u>	29 %	3
B	2 %	2 %	17 %	<u>47 %</u>	32 %	1
C	4 %	11 %	17 %	<u>30 %</u>	37 %	2

Tabelle 15: Probandenurteile zur Bewertung der Ausweichunterstützung bezüglich des Items "deutlich spürbar" für Hilfsmomentverläufe A („Rechteck“), B („Trapez“) und C („Dreieck“). Unterstrichene Werte markieren den Median. Die Spalte Rang ordnet die Hilfsmomentverläufe absteigend nach ihrer jeweiligen Rangsumme im Friedman-Test

	nicht spürbar	eher nicht spürbar	weder noch	eher deutlich spürbar	deutlich spürbar	Rang
A	8 %	21 %	19 %	<u>33 %</u>	19 %	1
B	15 %	30 %	<u>17 %</u>	26 %	13 %	2
C	26 %	15 %	<u>15 %</u>	34 %	11 %	3

Tabelle 16: Probandenurteile zur Bewertung der Ausweichunterstützung bezüglich des Items "leicht übersteuerbar" für Hilfsmomentverläufe A („Rechteck“), B („Trapez“) und C („Dreieck“). Unterstrichene Werte markieren den Median. Die Spalte Rang ordnet die Hilfsmomentverläufe absteigend nach ihrer jeweiligen Rangsumme im Friedman-Test

	schwer übersteuerbar	eher schwer übersteuerbar	weder noch	eher leicht übersteuerbar	leicht übersteuerbar	Rang
A	8 %	15 %	<u>40 %</u>	25 %	13 %	2
B	8 %	13 %	<u>52 %</u>	21 %	6 %	3
C	6 %	15 %	<u>42 %</u>	21 %	17 %	1

Tabelle 17: Probandenurteile zur Bewertung der Ausweichunterstützung bezüglich des Items "befreiend" für Hilfsmomentverläufe A („Rechteck“), B („Trapez“) und C („Dreieck“). Unterstrichene Werte markieren den Median. Die Spalte Rang ordnet die Hilfsmomentverläufe absteigend nach ihrer jeweiligen Rangsumme im Friedman-Test

	gängelnd	eher gängelnd	weder noch	eher befreiend	befreiend	Rang
A	6 %	6 %	<u>51 %</u>	26 %	11 %	3
B	0 %	7 %	<u>51 %</u>	38 %	4 %	2
C	0 %	11 %	<u>44 %</u>	33 %	11 %	1

Tabelle 18: Probandenurteile zur Bewertung der Ausweichunterstützung bezüglich des Items "entlastend" für Hilfsmomentverläufe A („Rechteck“), B („Trapez“) und C („Dreieck“). Unterstrichene Werte markieren den Median. Die Spalte Rang ordnet die Hilfsmomentverläufe absteigend nach ihrer jeweiligen Rangsumme im Friedman-Test

	beanspruchend	eher beanspruchend	weder noch	eher entlastend	entlastend	Rang
A	2 %	11 %	21 %	<u>49 %</u>	17 %	3
B	0 %	2 %	39 %	<u>47 %</u>	22 %	1
C	0 %	9 %	22 %	<u>53 %</u>	16 %	2

Tabelle 19: Probandenurteile zur Bewertung der Ausweichunterstützung bezüglich des Items "unterstützend" für Hilfsmomentverläufe A („Rechteck“), B („Trapez“) und C („Dreieck“). Unterstrichene Werte markieren den Median. Die Spalte Rang ordnet die Hilfsmomentverläufe absteigend nach ihrer jeweiligen Rangsumme im Friedman-Test

	behindernd	eher behindernd	weder noch	eher unterstützend	unterstützend	Rang
A	4 %	9 %	17 %	<u>49 %</u>	21 %	3
B	0 %	7 %	16 %	<u>44 %</u>	33 %	1
C	2 %	11 %	13 %	<u>42 %</u>	31 %	2

Tabelle 20: Probandenurteile zur Bewertung der Ausweichunterstützung bezüglich des Items "erhöht Sicherheit" für Hilfsmomentverläufe A („Rechteck“), B („Trapez“) und C („Dreieck“). Unterstrichene Werte markieren den Median. Die Spalte Rang ordnet die Hilfsmomentverläufe absteigend nach ihrer jeweiligen Rangsumme im Friedman-Test

	verringert Sicherheit	verringert Sicherheit eher	weder noch	erhöht Sicherheit eher	erhöht Sicherheit	Rang
A	6 %	6 %	19 %	<u>40 %</u>	29 %	3
B	6 %	6 %	13 %	<u>42 %</u>	33 %	1
C	8 %	2 %	17 %	<u>42 %</u>	31 %	2

Bei der Frage, ob die Probanden eine Ausweichassistentz ähnlich der eben erlebten in ihrem Fahrzeug akzeptieren würden, stimmten 44 von 49 Probanden zu und bescheinigten der Lenkunterstützung damit eine solide Akzeptanz. 5 von 49 Teilnehmern verneinten die Frage mit folgenden Begründungen (wobei der zuletzt aufgeführte Punkt von 2 Probanden genannt wurde):

- Der Einfluss auf das Lenkverhalten sei zu gering,
- man dürfe nicht auf die Technik vertrauen, da man sonst wertvolle Fähigkeiten verlere,
- die Lenkunterstützung sei zwar für vorsichtige Fahrer sicherlich hilfreich, führe aber bei einem sicheren Fahrer zu einer Neigung zum Übersteuern,
- man wolle die Lenkunterstützung nicht einsetzen, bevor man nicht ausgiebig mit ihr trainiert habe, um ihr Verhalten genau kennen zu lernen.

6.5.4. Telexperiment 1d – Falschauslösung

Zur Untersuchung der Kontrollierbarkeit der Lenkunterstützung erlebten die Probanden in Versuchsteil 1d in einer Kurve eine unberechtigte Auslösung sowohl der Aus-, wie auch der Einlenkunterstützung (siehe Szenario „Kurvenfahrt“).

6.5.4.1. Subjektive Daten

Nach Erleben der unberechtigten Systemauslösung wurden die Probanden gebeten, die Falschauslösung auf der SBS (Neukum & Krüger, 2003) zu beurteilen.

Tabelle 21 zeigt die beobachteten Urteile. Diese sind sowohl für alle Probanden („insgesamt“) angegeben, als auch getrennt für die beiden Probandengruppen, die Versuchsteil 1d entweder am Anfang des Versuchs („Falschauslösung zuerst“) oder am Ende des Versuchs („Falschauslösung zuletzt“) erlebt hatten.

Tabelle 21: Probandenurteile zur Bewertung der Falschauslösung einer Ausweichunterstützung auf der SBS (nach Neukum & Krüger, 2003) für alle Probanden („insgesamt“), sowie die Probandengruppen, die die Falschauslösung zu Beginn des Versuchs („Falschauslösung zuerst“) oder am Ende („Falschauslösung zuletzt“) erlebten

SBS-Wert	Insgesamt (n=48)	Falschauslösung zuerst (n=24)	Falschauslösung zuletzt (n=24)	Urteilsbeschreibung	Urteilsbedeutung
10	0 %	0 %	0 %	unkontrollierbar	Fahrzeug nicht kontrollierbar
9	2 %	0 %	4 %	sehr gefährlich	Kompensatorischer Aufwand, um Fahrzeug in der Spur zu halten, war groß und nicht tolerierbar
8	0 %	0 %	0 %	gefährlich	
7	8 %	4 %	13 %	etwas gefährlich	Kompensatorischer Aufwand, um Fahrzeug in der Spur zu halten, war deutlich aber vertretbar
6	21 %	17 %	25 %	sehr störend	
5	15 %	13 %	<u>17 %</u>	störend	
4	<u>23 %</u>	<u>29 %</u>	17 %	etwas störend	Störung wurde bemerkt, aber hatte keinen oder nur geringen Einfluss auf die Fahraufgabe
3	21 %	33 %	8 %	stark spürbar	
2	6 %	4 %	8 %	spürbar	Störung wurde bemerkt, aber hatte keinen oder nur geringen Einfluss auf die Fahraufgabe
1	4 %	0 %	8 %	ein wenig spürbar	
0	0 %	0 %	0 %	nicht spürbar	nichts bemerkt

Im Median wurde der unberechtigte Systemeingriff als „etwas störend“ (insgesamt, Falschauslösung als erstes) oder „störend“ (Falschauslösung zuletzt) beurteilt. Insgesamt und dann, wenn die Falschauslösung als erstes erlebt wurde, entfielen weniger als 15 % der Urteile auf die Bereiche „gefährlich“ und „unkontrollierbar“ (SBS-Werte 7 bis 10). Solche Urteile gaben jedoch 17 % der Probanden, die die Falschauslösung zuletzt erlebt hatten.

6.5.4.2. Objektive Daten

Lenkradwinkel- und Trajektorienverläufe wurden ausgewertet, um die Kontrollierbarkeit der unberechtigten Auslösung der Lenkunterstützung mit objektiven Daten zu beurteilen. Die Falschauslösung verursachte deutliche Lenkwinkelausschläge im Bereich von circa 10° bis maximal 60°. Diese wurden durch die Fahrer innerhalb von 150 ms bis 300 ms nach Ende der Eingriffe vollständig kompensiert. Ein mehrfaches Überkompensieren und dadurch bedingtes „Nachschwingen“ der Lenkradausschläge war den Lenkradwinkelverläufen dabei nicht zu entnehmen. Die Auswirkung auf die Trajektorien war gering, nennenswerte Ausschläge in den aufgezeichneten Fahrverläufen sind nicht erkennbar. Nur ein Proband (2 %) verließ den Fahrstreifen.

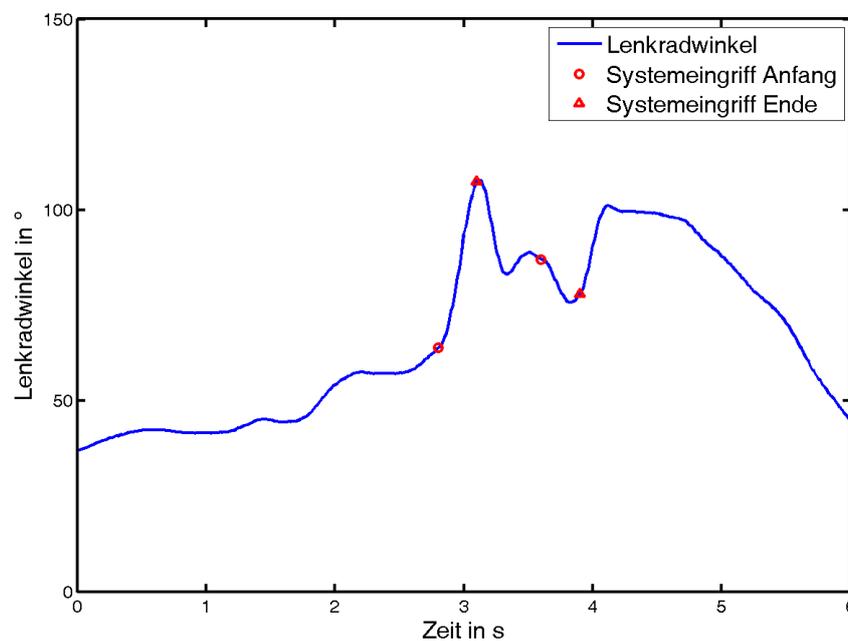


Abbildung 30: Lenkradwinkelverlauf bei Falschauslösung einer Ausweichunterstützung – repräsentativer Fall

Abbildung 30 zeigt Lenkradwinkelverlauf in einem repräsentativen Fall. Die Lenkwinkelausschläge bewegten sich in einem Rahmen von 15° bis 40°. Die Trajektorie erwies sich als unbeeinträchtigt. Abbildung 31 zeigt den Fall des Teilnehmers, der das extremste subjektive Urteil zur Kontrollierbarkeit der unberechtigten Systemauslösung („sehr gefährlich“) gab. Anhand der Trajektorie war jedoch erkennbar, dass der Proband das Fahrzeug innerhalb des Fahrstreifens halten konnte, obwohl er sich bereits vor der Falschauslösung am äußersten Fahrstreifenrand befand. Abbildung 32 zeigt den Fall, in dem die extremsten Lenkradwinkelausschläge beobachtet wurden. In diesem Fall wurde der Fahrstreifen verlassen. Die Überschreitung erfolgte eine knappe Sekunde nach dem Ende des Eingriffs, was die Frage aufwirft, ob sie ein Ergebnis des Systemeingriffs war. Die maximale laterale Überschreitung des Fahrstreifens betrug etwa 0,5 m.

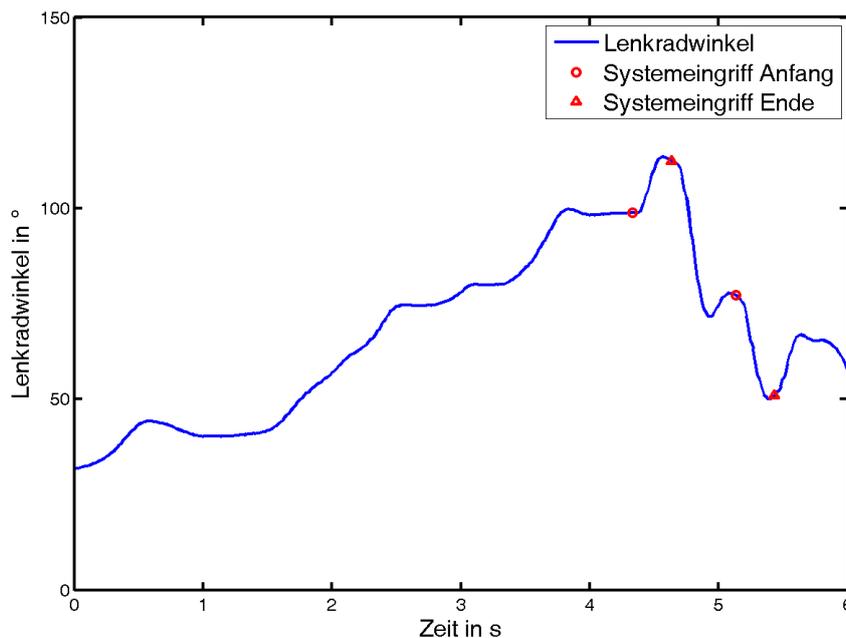


Abbildung 31: Lenkradwinkelverlauf bei Falschauslösung einer Ausweichunterstützung – subjektiv am gefährlichsten bewerteter Fall

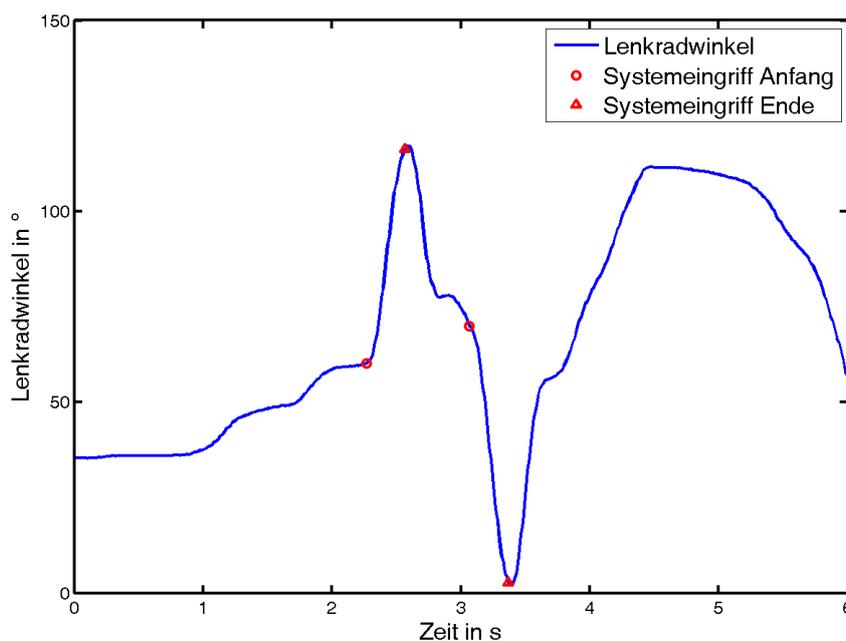


Abbildung 32: Lenkradwinkelverlauf bei Falschauslösung einer Ausweichunterstützung – objektiv gefährlichster Fall

6.6. Diskussion

Zunächst muss festgehalten werden, dass beim uninstruierten Erstkontakt nur 4 % der Fahrer beim überraschenden, sehr starken Abbremsen des vorausfahrenden Fahrzeugs ein Ausweichmanöver einleiteten. Dieser Befund macht deutlich, dass die Unterstützung eines fahrerinitiierten Ausweichmanövers Unfälle in ähnlichen Szenarien in nur sehr geringem Maße zu reduzieren vermag, wenn nicht zugleich Maßnahmen ergriffen werden, die zu häufigerem Einleiten von Ausweichmanövern führen.

Die Ergebnisse des Experiments zeigen jedoch, dass die Ausweichunterstützung einen Einfluss auf den Ausgang des Fahrmanövers haben kann. Dabei ist festzustellen, dass ein stärkeres Hilfsmoment im Vergleich zu einem schwächeren mehr Wirksamkeit zeigte: Es führte deskriptiv zu höherem maximalen Lenkradwinkel und höherer maximaler Lenkradwinkelgeschwindigkeit, obwohl das Handlenkmoment des Fahrers zugleich stärker entlastet wurde. Damit war es dem Fahrer möglich, mit geringerem Kraftaufwand einen stärkeren Lenkeinschlag zu erzeugen, sein Manöver also effektiver und effizienter durchzuführen. Interessant ist dabei der Befund, dass der hergestellte maximale Querver-satz (der mit durchschnittlich etwa 3 m fast eine volle Fahrstreifenbreite betrug) mit stärkerem Hilfsmoment (deskriptiv) geringer war, was vermutlich auf eine größere Wirksamkeit der Einlenkhilfe zurückzuführen ist. Dabei führten die stärkeren Hilfsmomente nicht zu einem Übersteuern oder gar einem Verreißen des Lenkrads. Abbildung 33 zeigt die durchschnittlichen Lenkradwinkelverläufe: Darin ist zu erkennen, dass die Verläufe für die erste Hälfte der Unterstützungsdauer identisch sind und sich erst ca. 150ms nach Einsetzen der Lenkhilfe merklich voneinander lösen.

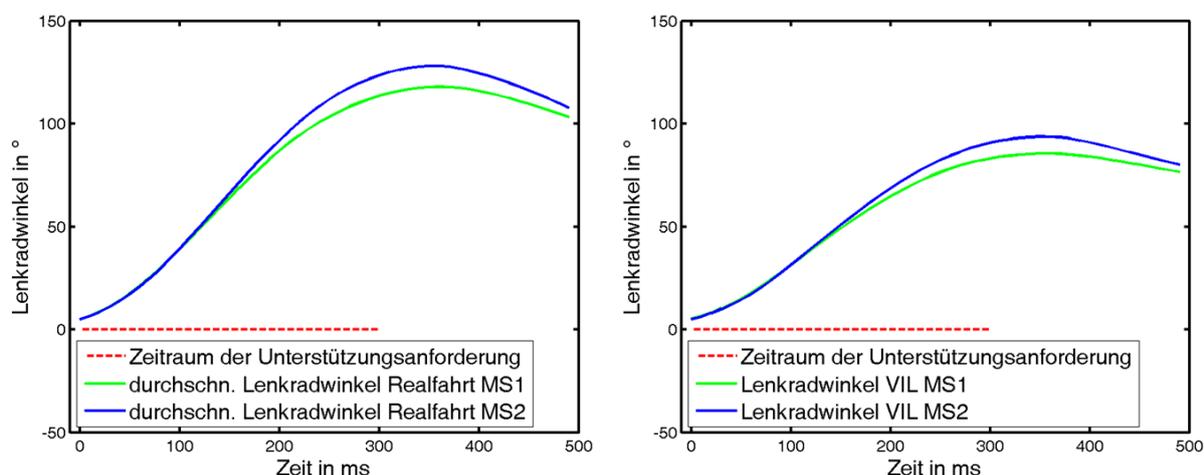


Abbildung 33: Durchschnittlicher Lenkradwinkelverlauf für Hilfsmomentstärke MS2 (links) und MS1 (rechts) bei Ausweichunterstützung, aufgeschlüsselt nach Fahrumgebung

Die Untersuchung wirft Bedenken bezüglich der Kontrollierbarkeit des stärkeren Hilfslenkmoments auf: Etwas mehr als 15 % der Probanden, die am Ende des Versuchs eine unberechtigte Systemauslösung erlebten, stuften diese als gefährlich oder unkontrollierbar ein. Die objektiven Fahrdaten stützen diese Urteile teilweise: Die durch den Systemeingriff verursachten Lenkwinkelausschläge waren zwar hoch, wurden von den Fahrern aber schnell und konsequent kompensiert, bevor sie sich in gefährlicher Weise auf die Trajektorie des Fahrzeugs auswirken konnten. Nur in einem Fall wurde die Fahrstreifengrenze überfahren, dies aber erst fast eine Sekunde nach Ende des Systemeingriffs und bei einer Fahrt, bei der sich das Fahrzeug bereits vor dem unberechtigten Systemeingriff am äußersten Rand des Fahrstreifens befand. Die Probanden, die die unberechtigte Systemauslösung im Versuchsablauf früher erlebten, beurteilten sie weitaus milder. Dieser Befund deutet darauf hin, dass das wie-

derholte Erleben der Lenkhilfen (im Zusammenspiel mit dem Auftrag, ihn sehr detailliert zu beurteilen) womöglich zu einer Sensitivierung der Probanden führte. Da die Gesamtheit der Probandenurteile das Fail-Kriterium für die Kontrollierbarkeit des Eingriffs nicht erfüllt und die Urteile derer, die die Falschaulösung zu Beginn des Versuchs erlebten, repräsentativer für den Ernstfall erscheinen, darf die untersuchte Lenkhilfe im untersuchten Szenario dennoch als subjektiv weitgehend kontrollierbar gelten: Von diesen Probanden wurde sie nur zu 4 % als „gefährlich“ oder „unkontrollierbar“ eingestuft. Dabei sollte jedoch beachtet werden, dass die Vorspannung der Lenkung bei Auftreten der Falschaulösung des Systemeingriffs zwar zwischen den Probanden sehr unterschiedlich (Lenkradwinkel zwischen $55,7^\circ$ und $101,1^\circ$), im Allgemeinen aber hoch war: Das vom System zunächst in Richtung der Kurveninnenseite aufgebrachte Lenkmoment war somit von geringem Einfluss, während die Fahrer vom anschließenden Lenkmoment in Richtung der Kurvenaußenseite (das nicht gegen die Vorspannung der Lenkung und dem Drang der Räder, sich gerade zu stellen, arbeiten musste) vermutlich nicht mehr überrascht waren (auch ersichtlich durch die geringeren Lenkradwinkelausschläge für den zweiten Teil des Eingriffs). Die Beherrschbarkeit des Hilfsmoments könnte somit überschätzt sein und sich bei überraschendem Auslösen zum Kurvenäußeren oder auf gerader Strecke als unzureichend erweisen. Einen Hinweis darauf, dass das bei der Falschaulösung verwendete Hilfsmoment an der Grenze des Beherrschbaren lag, liefert ein Vergleich der Lenkwinkelausschläge bei männlichen und weiblichen Fahrern: Zum Kurveninneren hin betrug diese im Durchschnitt $25,4^\circ$ (Männer) und $29,5^\circ$ (Frauen), zum Kurvenäußeren hin jedoch $9,4^\circ$ (Männer) und $19,8^\circ$ (Frauen) – ein Unterschied, der sich als statistisch signifikant erwies. Aufgrund der gegenüber Männern durchschnittlich um etwa ein Drittel geringeren Muskelkraft von Frauen (Grandjean, 1979) kann gefolgert werden, dass der Effekt des Hilfsmoments auf den Lenkradwinkel bei besonders schwachen Fahrern noch größer ausfällt und somit ein Gefahrenpotential birgt.

Zur Kontrollierbarkeit der unterschiedlichen Hilfslenkmomentverläufe im Fall eines berechtigten Systemeingriffs ergab sich ein ähnlich knappes Bild: Sowohl die Objektivdaten (zumindest für Signalformen A und C, die in mehr als 10 % der Fälle zum Verlassen der Fahrbahn führten), als auch die Subjektivdaten (mehr als 20 % beurteilten die Lenkhilfen als schwer oder eher schwer übersteuerbar) liefern Hinweise auf eingeschränkte Beherrschbarkeit. Objektiv scheint diese (zumindest für Signalform B, „Trapez“) insgesamt jedoch gegeben: Ein Verlassen der Fahrbahn oder ein dem Fahrereingriff entgegen gesetztes Systemlenkmoment traten hier selten bzw. nicht auf.

In Anbetracht des Gesamtbildes der Ergebnisse darf Hilfsmomentverlauf B (mit seiner geringen Anstiegssteilheit) als die beste der drei untersuchten Signalformen gelten: Deskriptiv führte Signalform B am häufigsten zur Kollisionsvermeidung (größte Wirksamkeit) und gleichzeitig am seltensten zum Verlassen der Fahrbahn (größte Kontrollierbarkeit). Zudem war die Abweichung von der Idealtrajektorie, die sich zwischen den Signalformen statistisch signifikant unterschied, bei Verlaufsform B am

geringsten. Die Überlegenheit der Signalform B erscheint zunächst überraschend, da das Ausmaß der Unterstützung (Lenkmoment integriert über die Zeit) mit einem Wert von 0,27 Nms geringer ist, als für die Signalformen A (0,50 Nms) und C (0,30 Nms). Die durchschnittlichen Lenkhandmomentverläufe (s. Abbildung 34) lassen die Lenkmomententlastung erkennen, die für alle drei Signalformen etwa proportional zum jeweiligen Hilfsmoment ist. Dabei deutet sich an, dass vor allem der schnelle Aufbau des angeforderten Hilfsmoments daran Schuld trägt, dass die Fahrerkraft kurzzeitig entgegen gerichtet ist, und damit vermutlich auch die geringere Effektivität dieser Lenkhilfen begründet. Dies bestätigt den Befund von Becker (2008), dass die Auswirkungen von überlagernden Systemlenkmomenten eher von der Anstiegssteilheit abhängen als von der Amplitude, anhand derer Grenzwerte bisher festgelegt wurden. Insgesamt stieß die untersuchte Art der Ausweichunterstützung unabhängig von der Verlaufsform bei der großen Mehrheit der Fahrer auf Akzeptanz und wurde in vielen relevanten Aspekten mehrheitlich positiv beurteilt, zum Beispiel als (eher) hilfreich, nützlich, unterstützend, entlastend, angenehm und die Sicherheit erhöhend.

Der Vergleich der Verhaltensdaten zwischen den Fahrten mit dem VIL-Fahrsimulator und den Realfahrten zeigt, dass das Querführungsverhalten im VIL-Fahrsimulator statistisch signifikant schwächer ausfällt. Auch subjektiv bewertete nur eine Minderheit der Probanden die beiden Untersuchungsumgebungen als genau gleichwertig. Die größte Probandengruppe gab an, bei der Realfahrt das Hindernis früher bemerkt und besser darauf reagiert zu haben, sowie dass die Situation bei der Realfahrt weniger kritisch und leichter zu meistern gewesen sei. Dieser Eindruck wird durch die objektiven Daten zum Reaktionspunkt gestützt: Durch eine objektiv frühere Reaktion verblieb den Fahrern mehr zeitlicher und räumlicher Abstand zum Hindernis, sodass die Situation leichter zu meistern war und weniger kritisch verlief. Der Unterschied in den Verhaltensdaten und die somit fehlende absolute Validität des VIL-Fahrsimulators könnten auf mehrere Gründe zurückzuführen sein. Zum einen Fehlen in der virtuellen Umgebung möglicherweise wichtige visuelle Relationspunkte, da weder das Ego-Fahrzeug (Cockpit, Motorhaube, etc.), noch die Arme und Hände des Fahrers im Anzeigebild repräsentiert waren. Zum anderen sind sowohl die Latenz von etwa 150 ms anzuführen, mit der Kopfbewegungen im

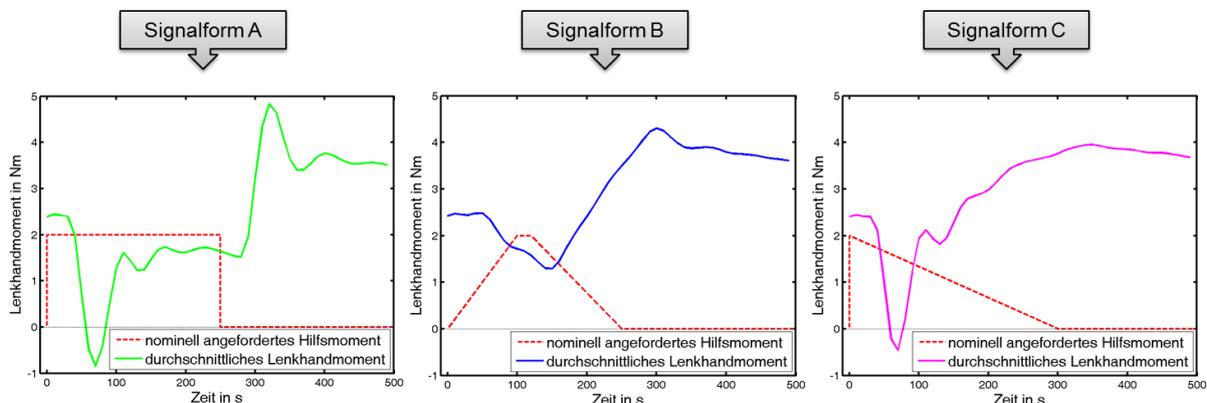


Abbildung 34: Durchschnittlicher Handlenkmomentverlauf beim Ausweichen mit Ausweichunterstützung mit Hilfsmomentverlauf A (links), B (Mitte) und C (rechts) (Experiment 1c)

Anzeigebild umgesetzt wurden, als auch eine mögliche Unsicherheit und Zurückhaltung der Probanden, die ein Fahrzeug bewegen mussten, ohne dabei ihre reale Umgebung sehen zu können. Die Unterschiede im Reaktionspunkt (und, davon abgeleitet, möglicherweise auch die anderen beobachteten Unterschiede) können jedoch auch von einem Reaktionszeitunterschied in Höhe von 0,3 s erklärt werden. Ein solcher Reaktionszeitunterschied wurde bei Untersuchungen mit dem VIL-Fahrsimulator bereits mehrfach festgestellt (für einen dynamischen Simulator z.B. bei Neukum, Naujoks, Kappes & Wey, 2014), bei Karl et al. (2013) für den VIL-Fahrsimulator beispielsweise in Höhe von 0,4 s. Während absolute Verhaltensvalidität für den VIL-Fahrsimulator in Bezug auf das Querführungsverhalten von Fahrern beim Notausweichen nicht gegeben ist, bescheinigen die Versuchsergebnisse aber eine vorhandene relative Verhaltensvalidität: Einflüsse der Lenkhilfe waren bei den Fahrten mit dem VIL-Fahrsimulator und bei den Realfahrten gleich gerichtet und von gleichem Ausmaß. Dabei ist festzuhalten, dass bei der Entwicklung sicherheitsrelevanter Fahrerassistenzsysteme der VIL-Fahrsimulator damit auch im Bereich der Lenkhilfen und des Notausweichens ein Werkzeug von großem Wert und Nutzen ist.

7. Experiment 2 - Ausweichempfehlung

7.1. Hintergrund

Gegenstand von Experiment 2 war eine multimodale Ausweichempfehlung. Dabei sollte eine Teilbremsung dazu beitragen, dass die potentielle Kollisionsenergie gemindert wird und dem Fahrer mehr Zeit zur Reaktion verbleibt. Eine Anzeige sollte den Fahrer auf die drohende Kollision aufmerksam machen helfen, ihn zur Durchführung eines Lenkmanövers auffordern, und ihm als Hinweis dafür dienen, dass das Fahrzeugverhalten (Bremsung, Lenkeingriff) von einem intentionalen Systemeingriff her rührt. Eine Lenkeingriffs-Komponente sollte den Fahrer ebenfalls auf die drohende Kollision aufmerksam machen helfen und ihn zur Durchführung eines Lenkmanövers auffordern. Die Studie hatte zum Ziel, die Wirksamkeit und Kontrollierbarkeit von Ausweichempfehlungen gegenüber einer Kontrollgruppe ohne Assistenz, sowie im Vergleich zwischen verschiedenen Systemvarianten zu prüfen.

Um die im VIL-Fahrsimulator beobachtete Verhaltensverzerrung (fehlende absolute Verhaltensvalidität) zu vermeiden, wurde Experiment 2 vollständig als Realfahrt durchgeführt. Als Ausweichszenario wurde ein von der Seite kommendes Hindernis gewählt, dessen plötzliches Auftauchen in kritischer Distanz leichter nachgestellt werden kann, als bei einem Hindernis im Längsverkehr. Aufgrund der Ansiedelung der Studie im thematischen Kontext des Forschungsprojekts UR:BAN (Lehsing, Bengler, Busch & Schendzielorz, 2013) und der im urbanen Verkehr geringen Geschwindigkeiten wurde eine geringe Eindringtiefe des Hindernisses in den Fahrstreifen des Ego-Fahrzeugs gewählt. So war gewährleistet, dass ein Ausweich- gegenüber einem Bremsmanöver auch bei niedriger Geschwindigkeit vorteilhaft erscheint. Um die Kontrollierbarkeit sowohl im Nutzenfall, als auch im Fehlerfall zu testen, wurde entschieden, eine berechnete Systemauslösung mit viel Manövrierraum, eine berechnete Systemauslösung mit wenig Manövrierraum, sowie eine unberechtigte Systemauslösung zu betrachten. Damit die Probanden unvorbereitet mit den Prüfscenarien konfrontiert werden konnten, machte der Versuch von einer coverstory Gebrauch.

7.2. Vorstudie

In einer Vorstudie fuhren 20 Probanden mehrfach entlang einer geraden Fahrbahn mit einer Fahrstreifenbreite von 3,5 m und je einem Fahrstreifen pro Fahrtrichtung. Die Probanden waren instruiert, ohne Einsatz eines Tempomaten möglichst exakt eine Geschwindigkeit von 50 kmh⁻¹ zu halten und sich ansonsten wie im alltäglichen Straßenverkehr zu verhalten. Bei der ersten, vierten, sechsten, siebten und elften Fahrt entlang der Versuchsstrecke wurde, aus einer Verdeckung am rechten Fahrbahnrand heraus, ein aus Schaumstoffquadern bestehendes Hindernis in die Fahrbahn gestoßen, das am

Ende seines Sturzes 1 m in den Fahrstreifen des Ego-Fahrzeugs ragte. Die Kippbewegung des Hindernisses auf die Fahrbahn wurde in einem Abstand von etwa 21 m zum Ego-Fahrzeug (TTC etwa 1,5 s) eingeleitet. Bei einer TTC von 1,2 s wurde im Ego-Fahrzeug in vier von fünf Fällen je eine von vier unterschiedlichen Ausweichempfehlungen ausgelöst. Die Systemeingriffe bestanden aus der Kombination von jeweils einer von zwei unterschiedlichen, in die Windschutzscheibe eingeblendeten Anzeigen, mit jeweils einem von zwei haptischen Signalen: entweder einem Lenkraddruck oder einer einseitig gewichteten Bremsung des Fahrzeugs. Zusätzlich erfolgte eine Teilbremsung. Jeder Proband erlebte sowohl eine Fahrt ohne Systemeingriff, als auch jede der vier möglichen (2 optische Signale x 2 haptische Signale) Systemkombinationen. Die Reihenfolge der Darbietung der unterschiedlichen experimentellen Bedingungen wurde anhand der Methode des lateinischen Quadrats balanciert. Zur Auswertung des Versuchs wurden Fahr-, Video- und Fragebogendaten aufgenommen.

Die Vorstudie ist aufgrund der mehrfachen Messwiederholungen je Proband nur eingeschränkt zur Vorhersage von Fahrerverhalten in einer überraschenden Notausweichsituation unter den Bedingungen des alltäglichen Realverkehrs geeignet. Wegen der manuellen Steuerung des Hindernisses war zudem die Varianz der tatsächlichen TTC bei Erscheinen des Hindernisses – obwohl diese im Mittel wie gewünscht und zwischen den Fahrten mit unterschiedlichen Systemvarianten statistisch nicht unterscheidbar war – vergleichsweise groß. Die Vorstudie ergab, dass die Zahl der Kollisionen mit dem Hindernis für alle Systemvarianten gegenüber der Fahrt ohne Assistenz deskriptiv (von 25 % ohne Assistenz auf 0 % bis 6 % mit Ausweichempfehlung) reduziert war. Zu beobachten war außerdem eine deskriptiv erhöhte Häufigkeit von Lenkreaktionen (von 75 % ohne Assistenz auf 79 % bis 94 % mit Ausweichempfehlung). Ein Erschrecken als Reaktion auf den Systemeingriff war in der Mimik der Probanden nicht erkennbar, ebenso wenig ein gefährliches Übersteuern oder Abkommen von der Fahrbahn. Die Systemeingriffe wurden von der großen Mehrheit der Probanden, die den Eingriff bemerkten, positiv (als hilfreich, effektiv, nützlich, unterstützend) bewertet. Insbesondere die Lenkeingriffs-Komponente wurde von den Probanden jedoch häufig nicht bewusst bemerkt.

Aufgrund der Ergebnisse des Vorversuchs wurden die Ausweichempfehlungen als grundsätzlich vielversprechend eingestuft. Wegen der geringen Anzahl an Kollisionen, selbst in der Kontrollbedingung, wurde beschlossen, das Hindernis im Hauptversuch erst in kürzerer Distanz in Erscheinung treten zu lassen. Außerdem sollte es automatisiert in Bewegung gesetzt werden, um eine hohe Varianz der TTC bei Erscheinen des Hindernisses zu vermeiden. Es wurde darüber hinaus beschlossen, die unterschiedlichen Systemvarianten im Hauptversuch nicht durch Messwiederholung zu testen, sondern als Intersubjektvariable zu führen, um den Einfluss von Erwartungs- und Lerneffekten bezüglich des Versuchsszenarios auf den Vergleich der Systemvarianten zu minimieren.

7.3. Stichprobe

An der Studie nahmen 60 Versuchspersonen teil. Die Stichprobe setzte sich aus 50 Männern und 10 Frauen zusammen, die jeweils über eine gültige Fahrerlaubnis der Klasse B verfügten und sich in fahrtüchtigem Zustand befanden. Die Versuchspersonen waren zwischen 21 und 76 Jahre alt ($M = 30.4$, $SD = 11.2$), verfügten über eine Fahrleistung von 3.000 bis 67.000 km ($M = 22500$, $SD = 11200$) in den vergangenen zwölf Monaten und über eine bisherige Gesamtfahrleistung von 6.000 bis 1.000.000 km ($M = 255800$, $SD = 217600$). Keiner der Probanden hatte im Vorfeld Erfahrungen mit CAPLOS.

7.4. Methodik

7.4.1. Messaufbau

Im Experiment „Ausweichempfehlungen“ wurde Versuchsträger 2 (Audi A7 Sportback) genutzt. Die Auslösung der Systemeingriffe und die Aufzeichnung der objektiven Messdaten erfolgte mittels ADTF 2.9. Lenkradwinkel, ABS- und ESP-Eingriffe wurden mit einer Frequenz von 50 Hz, Fahrzeugposition, -ausrichtung, -beschleunigungen und -drehraten mit einer Frequenz von 100 Hz, Videos von Fahrerportrait, Fahrerfußraum und Fahrszene vor dem Fahrzeug mit einer Bildrate von 25 fps aufgezeichnet. Die Messdatenaufzeichnung wurde in einem Ringspeicher vorgepuffert und erstreckte sich jeweils über die 5 s vor und die 10 s nach einer Systemauslösung. Zur Darstellung des Hindernisses wurde CAPLOS (s. Kapitel 5.2) verwendet.

7.4.2. Systembeschreibung

Alle Systemeingriffe wurden von einer Teilbremsung begleitet. Hierzu wurde eine Längsverzögerung von 3 ms^{-2} angefordert, die, ab Auslösung der Ausweichempfehlung, über einen Zeitraum von 200 ms linear aufgebaut, für 1100 ms gehalten, und über weitere 200 ms wieder linear abgebaut wurde.



Abbildung 35: Anzeige "Ausweichpfeil" (schwarze Bildanteile entfallen im HUD)

Als optisches Signal für die Ausweichempfehlung kamen zwei Anzeigen im Versuch zum Einsatz. Anzeige „Ausweichpfeil“ wurde über das HUD in einer Gesamtgröße von etwa fünf mal fünf Zentimetern in die Windschutzscheibe eingespiegelt und zeigte ein rotes Warndreieck, sowie einen grünen

Pfeil (vgl. Abbildung 35). Dabei sollten das Warndreieck das Hindernis und der grüne Pfeil eine mögliche Ausweichtrajektorie symbolisieren. Anzeige „Proprietär“ war eine proprietäre Anzeige, die ebenfalls zentral vor dem Fahrer in die Scheibenwurzel eingespiegelt wurde, deren Spezifikationen im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht offengelegt werden können. Die Anzeigen wurden ab Auslösung der Ausweichempfehlung für eine Dauer von 2,5 s aktiviert.

Als Lenkeingriffs-Komponente für die Ausweichempfehlung kamen zwei Varianten im Versuch zum Einsatz. Lenkeingriff „Lenkraddruck“ wurde als durch die Elektromotoren der EPS aufgebrachtes Lenkmoment nach links implementiert, dessen angeforderte Amplitude sich in einem Lenkmoment von etwa 3,3 Nm äußerte. Lenkeingriff „einseitige Bremsung“ war als einseitig gewichtete Bremsung implementiert, deren angeforderte Stärke sich in einer Gierrate von etwa 5°/s nach links äußerte. Beide Lenkeingriffe wurden mit einem linearen Anstieg von null auf ihren jeweiligen Maximalwert über einen Zeitraum von 50 ms, einem Halten des jeweiligen Maximalwerts für 500 ms, und einem anschließenden linearen Abbau vom jeweiligen Maximalwert auf null über einen Zeitraum von 50 ms angefordert.

Folglich fanden insgesamt vier verschiedene Systemvarianten der Ausweichempfehlung Anwendung:

- Teilbremsung mit Anzeige „Proprietär“ und Lenkeingriff „Lenkraddruck“ (A)
- Teilbremsung mit Anzeige „Proprietär“ und Lenkeingriff „einseitige Bremsung“ (B)
- Teilbremsung mit Anzeige „Ausweichpfeil“ und Lenkeingriff „Lenkraddruck“ (C)
- Teilbremsung mit Anzeige „Ausweichpfeil“ und Lenkeingriff „einseitige Bremsung“ (D)

7.4.3. Versuchsszenarien, -strecke und -material

Der Versuch fand auf einer langen Geraden des Testgeländes der UniBwM statt. Die Fahrbahn hatte eine Fahrstreifenbreite von 3,5 m und je einen Fahrstreifen pro Fahrtrichtung. Etwa in der Mitte der Versuchsstrecke gab eine mit Verkehrsleitkegeln abgesteckte Gasse auf einer Länge von etwa 100 m einen doppelten Fahrstreifenwechsel vor. Etwa 100 m vom Ende dieser Gasse entfernt, befand sich CAPLOS am rechten Fahrbahnrand, verdeckt durch einen parallel zur Maschine und quer zur Fahrbahn parkenden Audi A8L (vgl. Abbildung 36).



Abbildung 36: CAPLOS ein- (links) und ausgefahren (rechts) bei Experiment 2a

7.4.3.1. Szenario „berechtigte Auslösung“ mit viel Manövrierraum

Die Probanden fuhren im Ego-Fahrzeug ohne Nutzung des Tempomats mit einer Geschwindigkeit von etwa 50 kmh^{-1} . Im Verlauf der Annäherung an CAPLOS wurde bei einer TTC von 1,6 s das Funksignal zum Ausfahren des Hindernisses gesendet (das bei einer TTC von etwa 1,25 s erstmals für die Probanden sichtbar bewegte). Die von CAPLOS in die Fahrbahn eingebrachte Fahrzeugattrappe ragte in ihrer Endposition einen Meter in den Fahrstreifen des Ego-Fahrzeugs. Bei einer TTC von 1,2 s wurde (mit Ausnahme der Kontrollgruppe) eine Ausweichempfehlung angefordert. Der Gegenfahrstreifen war frei. Siehe Abbildung 37.

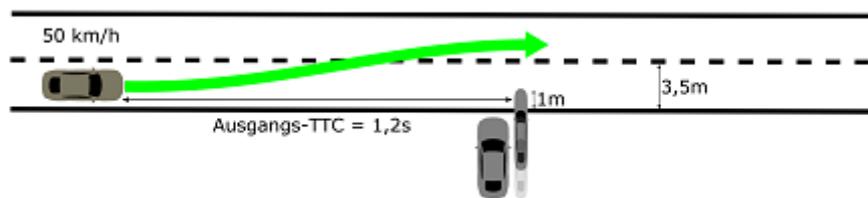


Abbildung 37: Versuchsanordnung, Szenario „berechtigte Auslösung mit viel Manövrierraum“

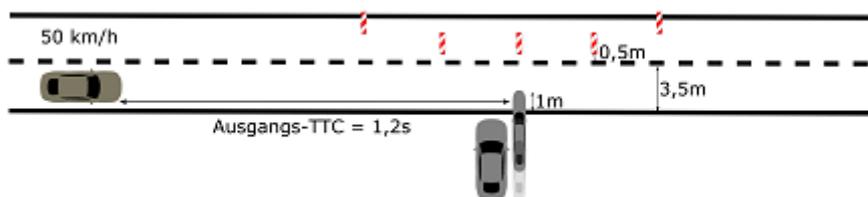


Abbildung 38: Versuchsanordnung, Szenario „berechtigte Auslösung mit wenig Manövrierraum“

7.4.3.2. Szenario „berechtigte Auslösung“ mit wenig Manövrierraum

Das Szenario glich in allen Belangen dem Szenario „berechtigte Auslösung mit viel Manövrierraum“, mit der Ausnahme, dass der Gegenfahrstreifen auf Höhe von CAPLOS mit einer Baustellenattrappe blockiert war. Diese bestand aus einer Absperrung durch gefahrlos crashbare Warnbaken aus Styropor, die 0,5 m von der Fahrbahnmitte entfernt im Gegenfahrstreifen aufgestellt waren, sowie einer dahinter befindlichen Baumateriallager-Attrappe aus mehreren Schaumstoffquadern. Siehe Abbildung 38.

7.4.3.3. Szenario „unberechtigte Auslösung“

Die Probanden fuhren im Ego-Fahrzeug ohne Nutzung des Tempomats mit einer Geschwindigkeit von 50 kmh^{-1} . Auf freier Strecke, weit entfernt von CAPLOS und anderen Aufbauten, wurde dabei vom Versuchsleiter eine Ausweichempfehlung ausgelöst.

7.4.4. Versuchsdesign

7.4.4.1. Teilexperiment 2a (berechtigte Auslösung)

Versuchsteil 2a gründete auf einem 5 (Assistenzvariante) x 2 (Manövrierraum) Intersubjekt-Design mit Messwiederholung. Die Ausprägungen der UV sind in Tabelle 22 dargestellt. Die Reihenfolge, in der die unterschiedlichen Ausprägungen des Manövrierraums dargeboten wurden, war zwischen den Probanden durch Alternieren balanciert. Die in Versuchsteil 2a erhobenen AV sind in Tabelle 23 aufgeführt.

Tabelle 22: Unabhängige Variablen (UV) im Teilexperiment 2a

UV	Ausprägungen	Erhebungsart
<i>Assistenzvariante</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Assistenz • Ausweichempfehlung A („Proprietär“ + „Lenkraddruck“) • Ausweichempfehlung B („Proprietär“ + „einseitige Bremsung“) • Ausweichempfehlung C („Ausweichpfeil“ + „Lenkraddruck“) • Ausweichempfehlung D („Ausweichpfeil“ + „einseitige Bremsung“) 	Intersubjekt
<i>Manövrierraum</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Gegenfahrstreifen frei („viel“) • Gegenfahrstreifen belegt („wenig“) 	Innersubjekt

Auf Unterschiede zwischen den Assistenzvarianten bezüglich der subjektiven Kritikalität sowie (ohne Berücksichtigung der Kontrollgruppe) der Angemessenheit des Eingriffszeitpunkts wurde jeweils unter Verwendung des Kruskal-Wallis-Tests (Marascuilo, 1988) geprüft. Auf Unterschiede zwischen den Assistenzvarianten bezüglich der Häufigkeit des Bemerkens der Anzeige oder des Lenkeingriffs wurde unter Verwendung des Pearson- χ^2 -Tests (Bortz, 1990) ohne Berücksichtigung der Kontrollgruppe geprüft. Auf Unterschiede zwischen den Assistenzvarianten bezüglich der Häufigkeit von Primärkollisionen und des Verlassens der Fahrbahn wurde je Ausprägung des Manövrierraums jeweils unter Verwendung des Pearson- χ^2 -Tests geprüft. Auf Unterschiede zwischen den Assistenzvarianten oder des Manövrierraums bezüglich maximalem Lenkradwinkel, maximalem Querversatz, lateraler Distanz zum Hindernis, maximaler Querbeschleunigung und maximaler Längsverzögerung wurde jeweils unter Verwendung einer zweiseitigen zweifaktoriellen (Ausweichassistenz, Reihenfolge der Darbietung des Manövrierraums) ANOVA mit Messwiederholung (Manövrierraum) getestet. Alle Tests legten ein Signifikanzniveau von $\alpha = 5\%$ zu Grunde.

Tabelle 23: Abhängige Variablen (AV) im Teilexperiment 2a

AV	[AV]	Operationalisierung
<i>Subjektive Kritikalität</i>	-	Probandenurteil auf SBFV
<i>Angemessenheit Eingriffszeitpunkt</i>	-	Anhang H: Fragebogen 2.2
<i>Bemerken der Anzeige</i>	-	Anhang H: Fragebogen 2.2
<i>Interpretation der Anzeige</i>	-	Anhang H: Fragebogen 2.2
<i>Bemerken des Lenkeingriffs</i>	-	Anhang H: Fragebogen 2.2
<i>Interpretation des Lenkeingriffs</i>	-	Anhang H: Fragebogen 2.2
<i>Reaktionsabsicht</i>	-	Anhang H: Fragebogen 2.2
<i>Empfundener Einfluss der Assistenz</i>	-	Anhang H: Fragebogen 2.2
<i>Primärkollision</i>	-	Zusammenstoß von Ego-Fahrzeug und Hindernis
<i>Verlassen der Fahrbahn</i>	-	Überfahren der Fahrbahnbegrenzungslinien
<i>Sekundärkollision</i>	-	Zusammenstoß mit der Baustellenabsperrung bei belegtem Gegenfahrstreifen
<i>Maximaler Lenkradwinkel</i>	1°	Maximalbetrag des Lenkradwinkels von der Anforderung des Hindernisses bis 2,5 s danach
<i>Maximaler Querversatz</i>	1 m	Maximaler Versatz nach links (gemessen an Mitte Hinterachse) während des Ausweichmanövers
<i>Laterale Distanz zum Hindernis</i>	1 m	Laterale Distanz zwischen rechter vorderer Fahrzeugecke und Spitze des Hindernisses beim Passieren oder Erreichen des Stillstands
<i>Maximale Querb beschleunigung</i>	1 ms ⁻²	Maximalbetrag der Querb beschleunigung während des Ausweichmanövers
<i>Maximale Längsverzögerung</i>	1 ms ⁻²	Minimalbetrag der Längsb beschleunigung während des Ausweichmanövers

7.4.4.2. Teilexperiment 2b (unberechtigte Auslösung)

Teilexperiment 2b gründete auf einem einfaktoriellen Intersubjekt-Design mit vier Ausprägungen der Ausweichassistenz (Ausweichempfehlung A, Ausweichempfehlung B, Ausweichempfehlung C, Ausweichempfehlung D, vgl. Tabelle 24). Dabei wurden die Probanden jeweils mit einer Variante der Ausweichempfehlung konfrontiert, deren Anzeige- und Lenkeingriffs-Komponenten sie in Teilexperiment 2a nicht erlebt hatten (D statt A und vice versa, C statt B und vice versa – Probanden der Kontrollgruppe wurden in Teilexperiment 2b zu jeweils gleichen Anteilen den vier Ausweichempfehlungen zugewiesen). Die in Versuchsteil 2b erhobenen AV sind in Tabelle 25 aufgeführt.

Auf Unterschiede zwischen den Ausweichempfehlungen bezüglich der empfundenen Beeinträchtigung der Fahraufgabe und der Akzeptanz wurde unter Verwendung des Kruskal-Wallis-Tests geprüft. Auf Unterschiede zwischen den Ausweichempfehlungen bezüglich der Häufigkeit des Verlassens des

Fahrstreifens und starker Bremsungen wurde jeweils unter Verwendung des Pearson- χ^2 -Tests geprüft. Auf Unterschiede zwischen den Ausweichempfehlungen bezüglich maximalem Querversatz und maximaler Verzögerung wurde jeweils unter Verwendung einer zweiseitigen einfaktoriellen ANOVA geprüft. Alle Tests legten ein Signifikanzniveau von $\alpha = 5\%$ zu Grunde.

Tabelle 24: Unabhängige Variablen (UV) in Telexperiment 2b

UV	Ausprägungen	Erhebungsart
<i>Assistenzvariante</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Ausweichempfehlung A („Proprietär“ + „Lenkraddruck“) • Ausweichempfehlung B („Proprietär“ + „einseitige Bremsung“) • Ausweichempfehlung C („Ausweichpfeil“ + „Lenkradruck“) • Ausweichempfehlung D („Ausweichpfeil“ + „einseitige Bremsung“) 	Intersubjekt

Tabelle 25: Abhängige Variablen (AV) in Telexperiment 2b

AV	[AV]	Operationalisierung
<i>Empfundene Beeinträchtigung</i>	-	Probandenurteil auf SBS
<i>Akzeptanz</i>	-	Anhang I: Fragebogen 2.3
<i>Verlassen des Fahrstreifens</i>	-	Überfahren der Fahrstreifengrenze
<i>Maximaler Querversatz</i>	1 m	Maximalbetrag des Versatzes nach links (gemessen Mitte Hinterachse) im Zeitraum von der Anforderung des Systemeingriffs bis 2,5 s danach
<i>Maximale Verzögerung</i>	1 m/s ²	Minimalbetrag der Längsbeschleunigung im Zeitraum von der Anforderung des Systemeingriffs bis 2,5 s danach
<i>Starke Bremsung</i>	-	Auftreten einer maximalen Verzögerung von mindestens 7 ms ⁻²

7.4.5. Versuchsablauf

Zu Beginn des Versuchs füllten die Probanden einen Fragebogen zur Erfassung ihrer Fahrgewohnheiten und -erfahrung (Anhang G: Fragebogen 2.1) aus. Im Anschluss fand die Fahrzeuggewöhnung (Sitz-, Spiegel- und Lenkrad-Einstellung und eine standardisierte Serie von Fahrmanövern zum Kennenlernen von Beschleunigungs-, Brems- und Lenkverhalten sowie der Fahrzeugabmessungen) statt. Den Probanden wurden eingangs falsche Informationen zum Versuchsinhalt gegeben.

Es folgte Versuchsteil 2a (berechtigte Auslösung). Dabei erlebten die Probanden eines der Szenarien „berechtigte Auslösung“ – entweder mit viel oder mit wenig Manövrierraum. Nach Bewältigung der Situation erschien ein zweiter, dem Probanden bis dahin fremder, Versuchsassistent. Dieser gab vor,

für CAPLOS verantwortlich zu sein und die Ausweichsituation unabsichtlich durch Vorbereitungsarbeiten für den eigenen Fahrversuch verursacht zu haben. Der Versuchsleiter unterstützte diese Legende durch gespielte Überraschung und Tadel. Der fremde Versuchsassistent bat den Probanden, die Situation und die erlebte Ausweichassistenz für ihn zu bewerten (Anhang H: Fragebogen 2.2). Auf diese Weise konnte die coverstory des Experiments weiterhin aufrechterhalten werden.

Nach mehreren ereignislosen Fahrten im Rechts- und im simulierten Linksverkehr wurde der Proband erneut mit dem Szenario „berechtigte Auslösung“, jedoch mit der bisher jeweils nicht erlebten Ausprägung des Manövrierraums (wenig statt viel oder vice versa), konfrontiert. Nach Bewältigung der Situation wurden diese und die erlebte Ausweichassistenz bewertet (Anhang H: Fragebogen 2.2). Die Probanden wurden zu diesem Zeitpunkt vollständig über den wahren Versuchszweck aufgeklärt.

Im Anschluss erlebten Probanden den Versuchsteil 2b (unberechtigte Auslösung), in dem sie mit dem Szenario „unberechtigte Auslösung“ konfrontiert wurden. Nach Bewältigung der Situation wurden die Probanden gebeten, die Falschauslösung der Ausweichassistenz und ihre Auswirkungen (Anhang I: Fragebogen 2.3) zu beurteilen.

7.5. Ergebnisse

7.5.1. Teilexperiment 2a – berechtigte Auslösung

7.5.1.1. Subjektive Daten

Die Urteile zur Angemessenheit des Zeitpunkts für den Systemeingriff beim Erstkontakt (erste berechtigte Auslösung) sind in Tabelle 26 dargestellt. Nur wenige Probanden ($n = 29$) machten hierzu eine Angabe. Viele Probanden gaben an, keinen Systemeingriff bemerkt zu haben. Die Unterschiede sind statistisch nicht signifikant, $H(3, N=29) = 1.86, p = .60$.

Tabelle 26: Fahrerurteile zur Angemessenheit des Eingriffszeitpunkts der Ausweichempfehlung bei Erstkontakt für Systemvarianten A (proprietäre Anzeige, Lenkraddruck), B (proprietäre Anzeige, einseitige Bremsung), C (Ausweichpfeil, Lenkraddruck) und D (Ausweichpfeil, einseitige Bremsung)

	zu früh	eher zu früh	genau richtig	eher zu spät	zu spät
A	0 %	0 %	63 %	38 %	0 %
B	0 %	0 %	33 %	50 %	17 %
C	0 %	0 %	56 %	33 %	11 %
D	0 %	17 %	50 %	17 %	17 %

Die Probanden bewerteten die Kritikalität der erlebten Fahrsituation auf der Skala zur Bewertung von Fahr- und Verkehrssituationen (Neukum, Lübbecke, Krüger, Mayser & Steinle, 2008). Die Verteilung der Urteile ist für die unterschiedlichen Ausprägungen des Faktors Ausweichassistenz in Abbildung

39 dargestellt. Die Unterschiede sind statistisch nicht signifikant, $H(4, N=115) = 2.82, p = .59$. Auch in Hinblick auf den Manövrierraum, $U(115) = 1485.00, p = .34$, und den Durchgang (erste vs. zweite berechnete Auslösung), $Z(115) = 0.24, p = .81$, zeigten sich keine statistisch signifikanten Unterschiede.

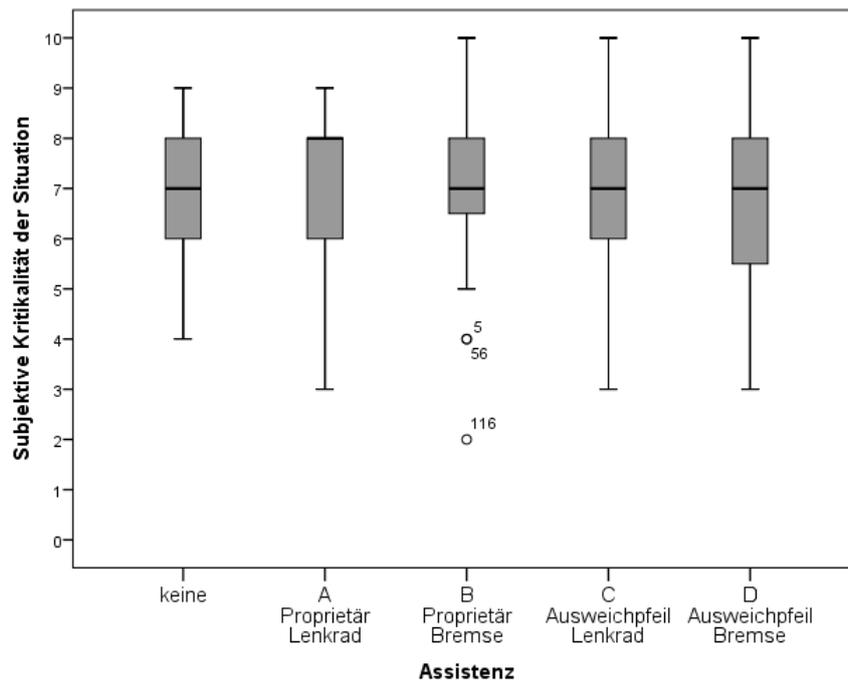


Abbildung 39: Verteilung der Probandenurteile zur Bewertung der Fahrsituation bei plötzlich auftretendem Hindernis, aufgeschlüsselt nach Systemausprägung (Experiment 2a)

Tabelle 27 fasst zusammen, mit welcher Häufigkeit Probanden angaben, beim Erstkontakt (erste berechnete Auslösung) eine Anzeige oder einen Lenkeingriff bemerkt zu haben. Die Unterschiede zwischen den Systemvarianten sind weder für das Bemerkens der Anzeige, $\chi^2(3, N=48) = 1.78, p = .62$, noch das Bemerkens des Lenkeingriffs, $\chi^2(3, N=48) = 4.65, p = .20$, statistisch signifikant.

Tabelle 27: Relative Häufigkeit des Bemerkens der Anzeige und des Lenkeingriffs einer Ausweichempfehlung bei Erstkontakt für Systemvarianten A (proprietäre Anzeige, Lenkraddruck), B (proprietäre Anzeige, einseitige Bremsung), C (Ausweichpfeil, Lenkraddruck) und D (Ausweichpfeil, einseitige Bremsung)

Bei Erstkontakt...	A	B	C	D
...Anzeige bemerkt	50%	33%	42%	25%
...Lenkeingriff bemerkt	33%	17%	58%	33%

Probanden, die beim Erstkontakt angaben, eine Anzeige bemerkt zu haben, wurden nach deren Bedeutung gefragt. Die offenen Antworten wurden den Klassen „Ausweichempfehlung“, „Hinweis auf automatisches Ausweichen“, „Kollisionswarnung“, „Allgemeine Warnung“ und „Sonstiges“ zugewiesen. Die Häufigkeiten von Antworten der jeweiligen Klasse sind in Tabelle 28 dargestellt.

Tabelle 28: Relative Häufigkeit der Interpretationen der Anzeige bei Erstkontakt

	Ausweich- empfehlung	Hinweis auf automati- sches Auswei- chen	Kollisions- warnung	Unspezifische Warnung	Sonstiges
„Proprietär“	0 %	0 %	80 %	10 %	10 %
„Ausweichpfeil“	13 %	38 %	13 %	25 %	13 %

Probanden, die beim Erstkontakt angaben, einen Lenkeingriff bemerkt zu haben, wurden nach dessen Bedeutung gefragt. Die offenen Antworten wurden den Klassen „Ausweichempfehlung“, „Ausweichehilfe“, „Ausweichautomatik“ und „Sonstiges“ zugewiesen. Die Häufigkeiten von Antworten der jeweiligen Klasse sind in Tabelle 29 dargestellt.

Tabelle 29: Relative Häufigkeit der Interpretationen des Lenkeingriffs bei Erstkontakt

	Ausweichemp- fehlung	Ausweichehilfe	Ausweichauto- matik	Sonstiges
Lenkraddruck	9 %	27 %	45 %	18 %
Einseitige Bremsung	33 %	17 %	50 %	0 %

Probanden wurden gebeten, ihre Reaktionsabsicht (lenken, bremsen, lenken und bremsen) bei Eintreten der kritischen Situation anzugeben. Die Unterschiede in den Antwortmustern sind zwischen den Systemvarianten weder bei freiem, $\chi^2(4, N=30) = 11.60, p = .17$, noch bei belegtem Gegenfahrstreifen, $\chi^2(4, N=30) = 9.53, p = .30$, statistisch signifikant.

Probanden wurden zudem gebeten, anzugeben, ob der Systemeingriff ihre Reaktionsabsicht beeinflusst hat („ja“, „nein“, „kein Urteil“). Die Unterschiede in den Antwortmustern sind zwischen den Systemvarianten weder bei freiem, $\chi^2(4, N=30) = 9.85, p = .28$, noch bei belegtem Gegenfahrstreifen, $\chi^2(4, N=30) = 6.20, p = .63$, statistisch signifikant.

7.5.1.2. Objektive Daten

Tabelle 30 zeigt die absolute Anzahl (und relativen Häufigkeiten) der beobachteten Primärkollisionen. Der Unterschied zwischen den Ausprägungen der Ausweichassistenz ist statistisch nicht signifikant, $\chi^2(4, N=118) = 8.53, p = .07$.

Tabelle 30: Absolute (und relative) Häufigkeiten von Primärkollisionen beim Ausweichen mit Ausweichempfehlung, aufgeschlüsselt nach Erst- und Zweitkontakt sowie Manövrierraum, für die Kontrollgruppe (KG) und Systemvarianten A (proprietäre Anzeige, Lenkraddruck), B (proprietäre Anzeige, einseitige Bremsung), C (Ausweichpfeil, Lenkraddruck) und D (Ausweichpfeil, einseitige Bremsung)

Primärkollisionen (absolut/relativ)	KG	A	B	C	D
Erstkontakt – viel Manövrierraum	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Erstkontakt – wenig Manövrierraum	2 (33%)	2 (33%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Zweitkontakt – viel Manövrierraum	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Zweitkontakt – wenig Manövrierraum	1 (17%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)

Ein Verlassen der Fahrbahn wurde in keinem Fall beobachtet. Auch eine Sekundärkollision (mit der Baustellenattrappe) trat in keinem Fall auf.

Die Ergebnisse in Bezug auf den maximalen Lenkradwinkel sind in Abbildung 40 dargestellt. Es wurde ein statistisch signifikanter Effekt des Manövrierraums beobachtet, $F(1, 46) = 18.56, p < .001, \eta_p^2 = .29$. Der Einfluss der Faktoren Ausweichassistenz, $F(4, 46) = 1.25, p = .30$, und die Reihenfolge der Darbietung des Manövrierraums (zuerst freier oder zuerst belegter Gegenfahrstreifen), $F(1, 46) = 0.82, p = .37$, waren statistisch nicht signifikant. Statistisch signifikante Interaktionseffekte wurden ebenfalls nicht beobachtet.

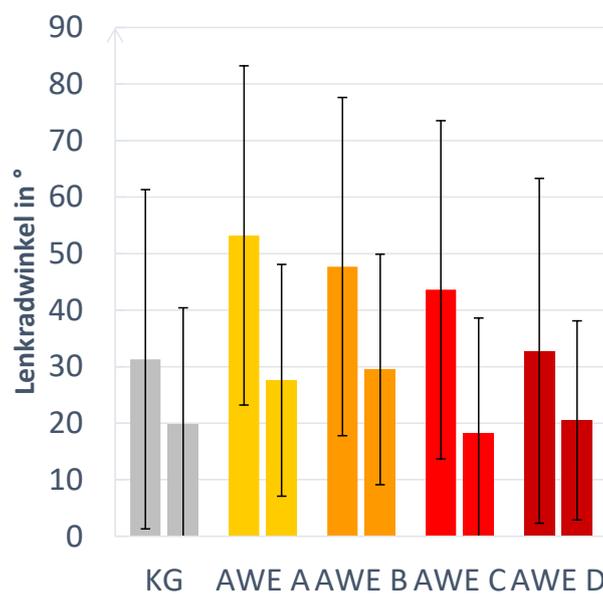


Abbildung 40: Maximaler Lenkradwinkel beim Ausweichen mit freiem (links) und belegtem Gegenfahrstreifen (rechts) für die Kontrollgruppe (KG) sowie die Ausweichempfehlungen (AWE) A (proprietäre Anzeige, Lenkraddruck), B (proprietäre Anzeige, einseitige Bremsung), C (Ausweichpfeil, Lenkraddruck) und D (Ausweichpfeil, einseitige Bremsung). Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung

Die Ergebnisse in Bezug auf den maximalen Querversatz sind in Abbildung 41 dargestellt. Es wurde ein statistisch signifikanter Effekt des Manövrierraums beobachtet, $F(1, 46) = 40.57, p < .001, \eta_p^2 = .47$.

Der Einfluss der Faktoren Ausweichassistentz, $F(4, 46) = 0.49, p = .79$) und die Reihenfolge der Darbietung des Manövrierraums (zuerst freier oder zuerst belegter Gegenfahrstreifen), $F(1, 46) = 3.96, p = .053$) waren statistisch nicht signifikant. Statistisch signifikante Interaktionseffekte wurden ebenfalls nicht beobachtet.

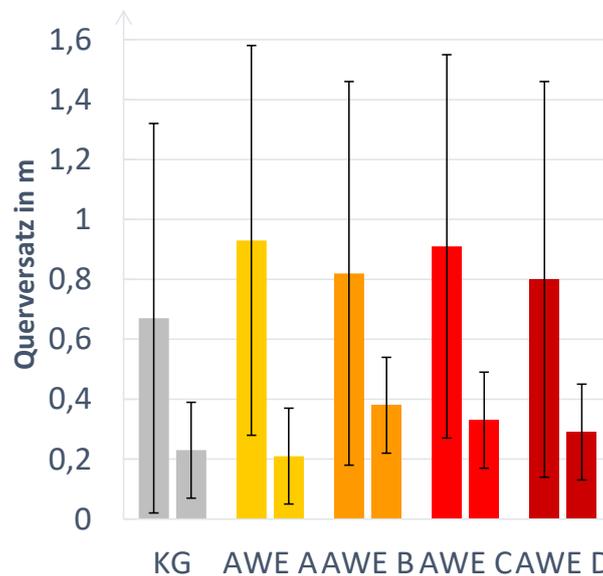


Abbildung 41: Maximaler nach links hergestellter Querversatz beim Ausweichen mit freiem (links) und belegtem Gegenfahrstreifen (rechts) für die Kontrollgruppe (KG) sowie die Ausweichempfehlungen (AWE) A (proprietäre Anzeige, Lenkraddruck), B (proprietäre Anzeige, einseitige Bremsung), C (Ausweichpfeil, Lenkraddruck) und D (Ausweichpfeil, einseitige Bremsung). Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung

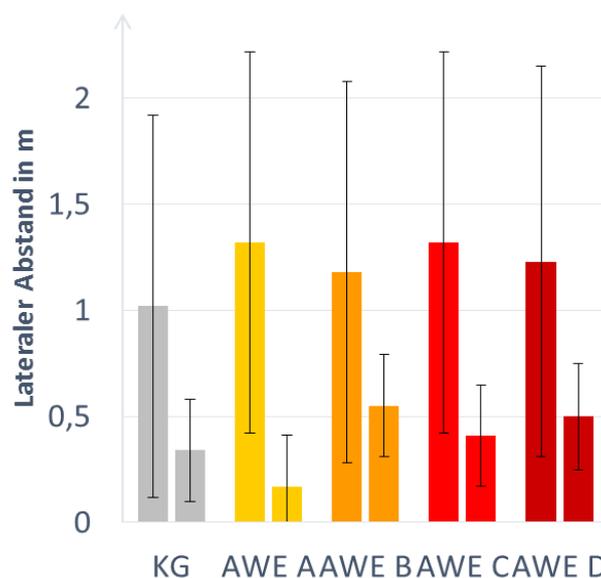


Abbildung 42: Laterale Distanz zum Hindernis beim Passieren beim Ausweichen mit freiem (links) und belegtem Gegenfahrstreifen (rechts) für die Kontrollgruppe (KG) sowie die Ausweichempfehlungen (AWE) A (proprietäre Anzeige, Lenkraddruck), B (proprietäre Anzeige, einseitige Bremsung), C (Ausweichpfeil, Lenkraddruck) und D (Ausweichpfeil, einseitige Bremsung). Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung

Die Ergebnisse in Bezug auf die laterale Distanz zum Hindernis sind in Abbildung 42 dargestellt. Es wurden jeweils ein statistisch signifikanter Effekt des Manövrierraums, $F(1, 46) = 48.87, p < .001, \eta_p^2 = .52$) und der Reihenfolge der Darbietung des Manövrierraums (zuerst freier oder zuerst belegter Gegenfahrstreifen), $F(1, 46) = 4.23, p = .05, \eta_p^2 = .08$, beobachtet. Der Einfluss des Faktors Ausweichassistentz war statistisch nicht signifikant, $F(4, 46) = 0.32, p = .86$. Statistisch signifikante Interaktionseffekte wurden ebenfalls nicht beobachtet.

Die Ergebnisse in Bezug auf die maximale Querbeschleunigung sind in Abbildung 43 dargestellt. Es wurden jeweils ein statistisch signifikanter Effekt des Manövrierraums, $F(1, 46) = 39.83, p < .001, \eta_p^2 = .46$, und der Reihenfolge der Darbietung des Manövrierraums (zuerst freier oder zuerst belegter Gegenfahrstreifen), $F(1, 46) = 4.86, p = .03, \eta_p^2 = .10$, beobachtet. Der Einfluss des Faktors Ausweichassistentz war statistisch nicht signifikant, $F(4, 46) = 1.35, p = 0.27$. Statistisch signifikante Interaktionseffekte wurden ebenfalls nicht beobachtet.

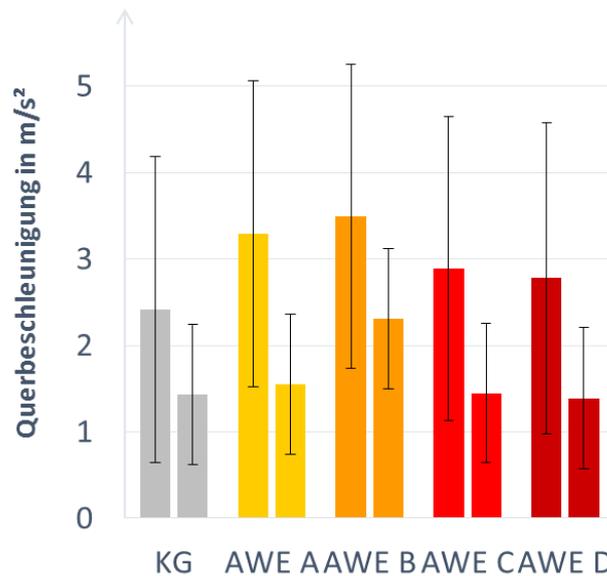


Abbildung 43: Maximale Querbeschleunigung beim Ausweichen mit freiem (links) und belegtem Gegenfahrstreifen (rechts) für die Kontrollgruppe (KG) sowie die Ausweichempfehlungen (AWE) A (proprietäre Anzeige, Lenkraddruck), B (proprietäre Anzeige, einseitige Bremsung), C (Ausweichpfeil, Lenkraddruck) und D (Ausweichpfeil, einseitige Bremsung). Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung

Die Ergebnisse in Bezug auf die maximale Verzögerung sind in Abbildung 44 dargestellt. Es wurden jeweils ein statistisch signifikanter Effekt des Manövrierraums, $F(1, 46) = 5.58, p = .02, \eta_p^2 = .11$) und der Reihenfolge der Darbietung des Manövrierraums (zuerst freier oder zuerst belegter Gegenfahrstreifen), $F(1, 46) = 17.57, p < .001, \eta_p^2 = .28$, sowie ein statistisch signifikanter Interaktionseffekt zwischen den Faktoren Manövrierraum und der Reihenfolge seiner Darbietung, $F(1, 46) = 5.65, p = .02, \eta_p^2 = .11$, beobachtet. Der Einfluss des Faktors Ausweichassistentz war statistisch nicht signifikant, $F(4, 46) = 0.49, p = .74$. Weitere statistisch signifikante Interaktionseffekte wurden ebenfalls nicht beobachtet.

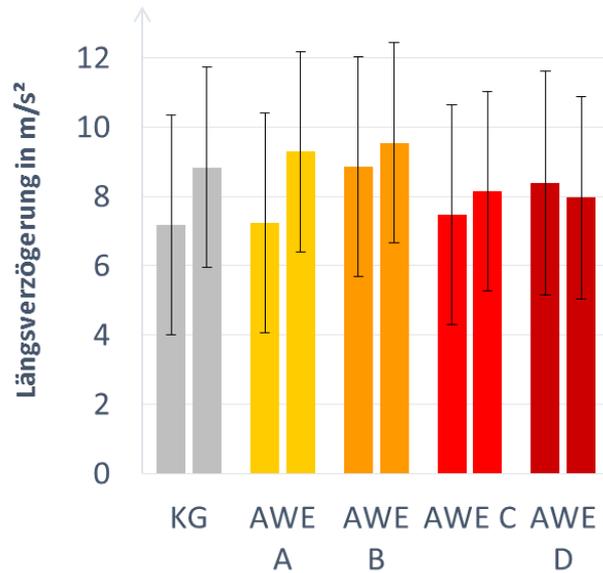


Abbildung 44: Maximale Längsverzögerung beim Ausweichen mit freiem (links) und belegtem Gegenfahrstreifen (rechts) für die Kontrollgruppe (KG) sowie die Ausweichempfehlungen (AWE) A (proprietäre Anzeige, Lenkraddruck), B (proprietäre Anzeige, einseitige Bremsung), C (Ausweichpfeil, Lenkraddruck) und D (Ausweichpfeil, einseitige Bremsung). Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung

7.5.2. Telexperiment 2b – unberechtigte Auslösung

7.5.2.1. Subjektive Daten

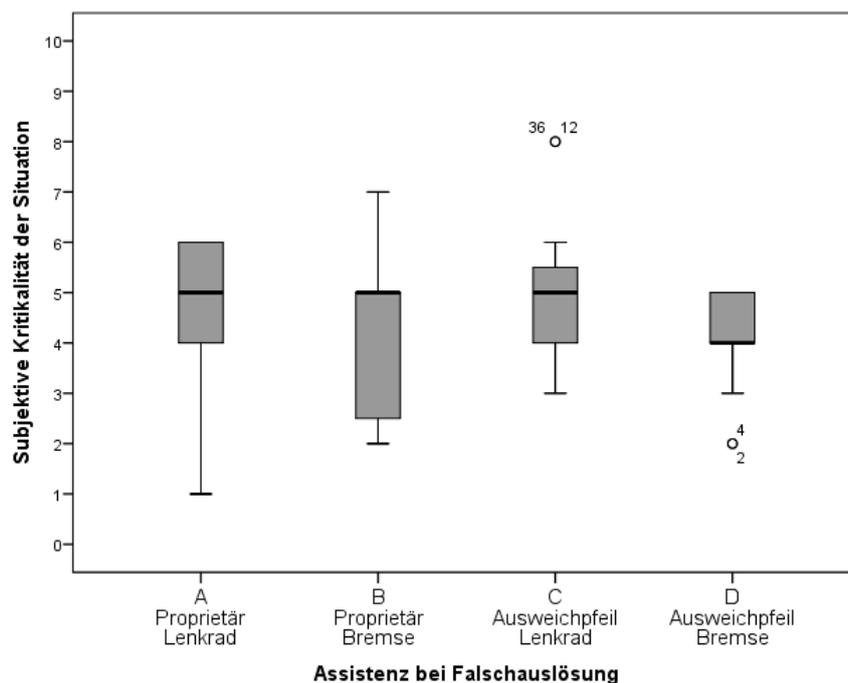


Abbildung 45: Probandenurteile zur Bewertung der Falschauslösung einer Ausweichempfehlung auf der SBS

Nach Erleben der Falschauslösung wurden die Probanden gebeten, die erlebte Beeinträchtigung beim Ausführen der Fahraufgabe auf der SBS einzuordnen. Die Verteilung der Probandenurteile ist in Abbildung 45 dargestellt. Die Unterschiede sind statistisch nicht signifikant, $H(3, N=59) = 3.34, p = .34$.

Die Probanden wurden nach der Falschauslösung zudem danach befragt, wie hoch ihre Akzeptanz eines Assistenzsystems wie dem erlebten im Angesicht der Möglichkeit von Falschauslösungen ist. Die Ergebnisse sind in Tabelle 31 dargestellt. Die Unterschiede zwischen den Systemvarianten sind statistisch nicht signifikant, $H(3, N=60) = 1.95, p = .58$.

Tabelle 31: Relative Häufigkeiten der Fahrerurteile zur Akzeptanz der Ausweichempfehlungen trotz erlebter Falschauslösung für die Ausweichempfehlungen A (proprietäre Anzeige, Lenkraddruck), B (proprietäre Anzeige, einseitige Bremsung), C (Ausweichpfeil, Lenkraddruck) und D (Ausweichpfeil, einseitige Bremsung)

	überhaupt nicht akzeptabel	eher nicht akzeptabel	unentschieden	eher akzeptabel	voll akzeptabel
A	33 %	13 %	13 %	33 %	7 %
B	15 %	31 %	0 %	38 %	15 %
C	31 %	23 %	23 %	23 %	0%
D	29 %	7 %	29 %	21 %	14 %

7.5.2.2. Objektive Daten

Der bei der Falschauslösung aufgetretene maximale Querversatz ist in Abbildung 46 dargestellt. Der Einfluss der Ausweichassistenz erwies sich als statistisch signifikant, $F(3, 56) = 4.35, p = .01, \eta_p^2 = .19$.

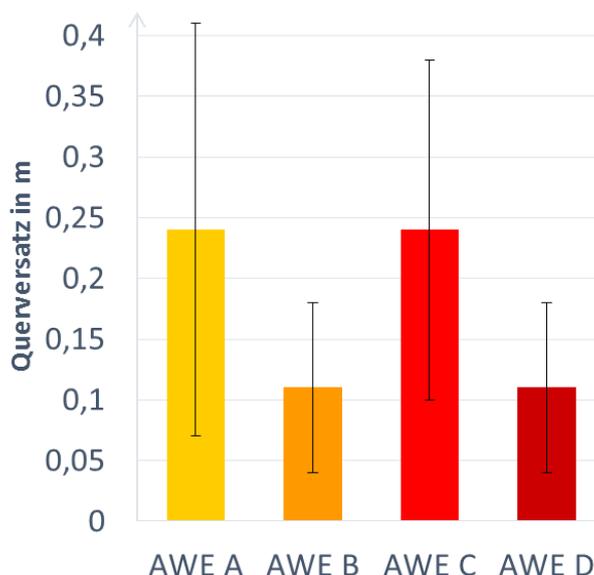


Abbildung 46: Maximaler hergestellter Querversatz bei Falschauslösung der Ausweichempfehlungen (AWE) A (proprietäre Anzeige, Lenkraddruck), B (proprietäre Anzeige, einseitige Bremsung), C (Ausweichpfeil, Lenkraddruck) und D (Ausweichpfeil, einseitige Bremsung). Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung

Die im Rahmen der Falschauslösung aufgetretene maximale Längsverzögerung ist in Abbildung 47 dargestellt. Der Einfluss der Ausweichassistenz war statistisch nicht signifikant, $F(3, 56) = 2.06$, $p = .12$.

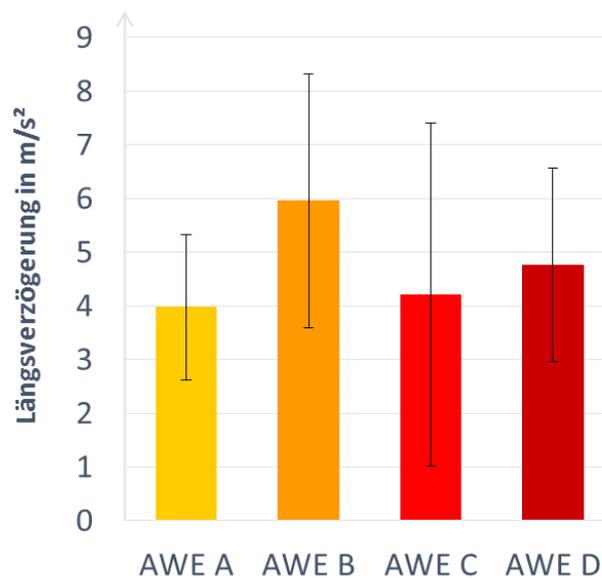


Abbildung 47: Maximale Längsverzögerung bei Falschauslösung der Ausweichempfehlungen (AWE) A (proprietäre Anzeige, Lenkraddruck), B (proprietäre Anzeige, einseitige Bremsung), C (Ausweichpfeil, Lenkraddruck) und D (Ausweichpfeil, einseitige Bremsung). Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung

Die Häufigkeit starker Bremsungen im Rahmen der Falschauslösung betrug 7 % (A), 31 % (B), 15 % (C) und 7 % (D). Der Einfluss der Ausweichassistenz war statistisch nicht signifikant, $\chi^2(3, N=55) = 4.13$, $p = .25$.

Ein Verlassen des Fahrstreifens wurde in keinem Fall festgestellt.

7.6. Diskussion

Die Zahl der Primärkollisionen war mit allen Ausweichempfehlungen deskriptiv niedriger, als in der Versuchsbedingung ohne Assistenz. Gleichzeitig waren bei freiem Gegenfahrstreifen mit allen Ausweichempfehlungen der maximale Lenkradwinkel, der maximale Querversatz, die laterale Distanz zum Hindernis, die maximale Gierrate und die maximale Querbeschleunigung gegenüber der Kontrollgruppe deskriptiv erhöht. Dies deutet auf eine Wirksamkeit der Ausweichempfehlungen hin. Diese Effekte entbehren jedoch der statistischen Signifikanz, wodurch eine Unwirksamkeit der geprüften Ausweichempfehlungen nicht als falsifiziert gelten kann.

Die Kontrollierbarkeit der untersuchten Ausweichempfehlungen erscheint hinreichend. Die deskriptiv höheren Querbeschleunigungen in den Versuchsbedingungen mit Ausweichempfehlung gegenüber der Kontrollgruppe lagen in etwa bei einem Drittel G und damit von der Stabilitätsgrenze weit entfernt. Die Ausweichempfehlungen führten nicht zu Überreaktionen (mit etwaigem Verlassen der

Fahrbahn). Bei eingeschränktem Manövrierraum traten mit allen Ausweichempfehlungen deskriptiv weniger Primärkollisionen auf, als in der Kontrollgruppe. Gleichzeitig wurden keine Sekundärkollisionen verursacht. Das Bremsverhalten der Probanden mit Ausweichempfehlung bei berechtigter Auslösung unterschied sich statistisch nicht von dem der Kontrollgruppe. Bei unberechtigter Auslösung kam es nicht zu Fahrstreifenübertretungen. Der dabei entstandene Querversatz von durchschnittlich weniger als 0,25 m ist als gering einzustufen. Für jede der Ausweichempfehlungen lagen weniger als 15% der Probandenurteile auf der SBS im Bereich „gefährlich“ oder „unkontrollierbar“. Einschränkend bezüglich der Kontrollierbarkeit ist lediglich zu nennen, dass die Mehrheit der Probanden als Reaktion auf die Falschauslösung zusätzlich (zur automatischen Teilbremsung) auf die Bremse trat. Dabei kam es in einigen Fällen zu starken Bremsungen, die als potentielle Gefahr für den nachfolgenden Verkehr betrachtet werden müssen. Der Anteil solcher starker Bremsungen war bei den Ausweichempfehlungen mit einseitiger Bremsung deskriptiv höher. Diese wurde von den Probanden andererseits deskriptiv als weniger kritisch eingestuft und führten zu statistisch signifikant geringerem Querversatz.

Abgesehen von diesen allgemeinen Aussagen zur Wirksamkeit und Kontrollierbarkeit der untersuchten Ausweichempfehlungen, können einige weitere Schlüsse gezogen werden. Die geringe Wirksamkeit der Ausweichempfehlungen könnte daher rühren, dass viele Probanden den Systemeingriff anscheinend nicht bewusst wahrgenommen haben. Nur maximal die Hälfte der Probanden hat im Erstkontakt eine Anzeige bemerkt und nur maximal 58 % der Probanden einen Lenkeingriff. Dabei wurde deskriptiv die Anzeige „Proprietär“ häufiger wahrgenommen, als die über das HUD geschaltete Anzeige „Ausweichpfeil“, was aufgrund der gegenüber dem HUD weitaus höheren Leuchtdichte und Anzeigengröße zu erwarten war. Zudem wurden beide Anzeigen häufiger in Kombination mit dem Lenkradruck, als in Kombination mit dem einseitigen Bremsruck bemerkt. Dies ist möglicherweise dadurch zu erklären, dass der einseitige Bremsruck vestibulär und zugleich durch die auftretenden Trägheitsmomente am ganzen Körper propriozeptiv wahrzunehmen ist, während der Lenkradruck nur propriozeptiv über Hände und Arme wirkt. Diese großflächigere Sinnesempfindung könnte nach dem Modell der beschränkten Ressourcen dazu führen, dass andere parallel dargebotene Reize, wie beispielsweise der optische Reiz der Anzeige, leichter der Aufmerksamkeit entgehen. Bei den Lenkeingriffen lässt sich ähnliches feststellen: Beide Lenkeingriffe wurden im Zusammenhang mit dem weniger intensiven optischen Reiz (der HUD-Anzeige „Ausweichpfeil“) deskriptiv häufiger wahrgenommen, als in Kombination mit dem stärkeren optischen Reiz. Deskriptiv wurde der einseitige Bremsruck insgesamt seltener bemerkt als der Lenkradruck, was vermutlich darauf zurückzuführen ist, dass er von vielen Probanden nicht als Lenkeingriff interpretiert wird und in der parallel durchgeführten Teilbremsung untergeht.

Zusätzlich zur geringen Häufigkeit, mit der die Komponenten der Ausweichempfehlungen wahrgenommen wurden, trägt vermutlich auch deren Interpretation zur geringen Wirksamkeit bei. Beide

Lenkeingriffe wurden von 45 % bis 50 % der Probanden, die sie bewusst wahrnahmen, als Eingriff einer Ausweichautomatik missverstanden. Ähnliches trifft auf die Anzeige „Ausweichpfeil“ zu, die von 38 % der Probanden, die sie bewusst wahrnahmen, als Hinweis auf ein vom Fahrzeug automatisch durchgeführtes Ausweichmanöver fehlinterpretiert wurde. Diese Ergebnisse erscheinen entmutigend und lassen große Zweifel an der potentiellen Wirksamkeit von solchermaßen gestalteten Ausweichempfehlungen aufkommen. Teilweise kann dieser Befund allerdings auch dem Szenario geschuldet sein, bei dem das Hindernis nur etwa 0,2 m der Spurbreite eines mittig im Fahrstreifen fahrenden Pkw blockierte. Zusammen mit dem Befund, dass die große Mehrheit der Probanden bereits vor Erscheinen des Hindernisses zur Fahrstreifenmitte eher links versetzt fahren, wird klar, dass bereits sehr kleiner Querversatz (wie er durch die kurzen Lenkeingriffe der Ausweichempfehlungen selbst bei unberechtigter Systemauslösung auftritt) für eine erfolgreiche Kollisionsvermeidung ausreicht und daher gerechtfertigt als Ausweichautomatik fehlinterpretiert werden kann.

Als weiteres, für eine positive Bewertung der geprüften Ausweichempfehlungen eher abträgliches, Probandenurteil kann die Akzeptanz der Systeme trotz Falschauslösung gelten: Trotz der objektiv hinreichenden Beherrschbarkeit, befanden nur 23 % bis maximal 53 % der Probanden die verschiedenen Ausweichempfehlungen in Anbetracht der Gefahr möglicher Falschauslösungen als „eher“ oder „voll akzeptabel“. Ein Gefühl der Bevormundung im Fall der berechtigten Systemauslösungen trat hingegen nicht auf: Nur 1 von 29 Probanden, die den Systemeingriff bei Erstkontakt wahrnahmen, beurteilte den Eingriffszeitpunkt als „eher zu früh“, die verbleibenden als „genau richtig“ oder „(eher) zu spät“. Dabei ist anzumerken, dass ein frühzeitigerer Eingriff nicht möglich gewesen wäre: Die Ausweichempfehlung wurde fast zeitgleich mit der ersten Sichtbarkeit des Hindernisses ausgelöst.

Während maximaler Lenkradwinkel und maximale Querbeschleunigung deskriptiv bei der Anzeige „Proprietär“ höher sind, als bei der Anzeige „Ausweichpfeil“, sind maximaler Querversatz und laterale Distanz zum Hindernis vor allem beim Lenkraddruck deskriptiv höher, als bei der einseitigen Bremsung. In der Tendenz am wirksamsten erscheint deshalb die Ausweichempfehlung A als Kombination der Anzeige „Proprietär“ mit dem Lenkeingriff „Lenkraddruck“. Hierzu ergibt sich jedoch kein völlig konsistentes Bild. Die geringe Differenzierbarkeit der verschiedenen Ausweichempfehlungen und die oben genannten Beobachtungen, dass Anzeige und Lenkeingriff ohnehin selten bemerkt und dazu häufig fehlinterpretiert werden, lassen plausibel erscheinen, dass die gegenüber der unassistierten Kontrollgruppe deskriptiv in Erscheinung getretenen Vorteile der Ausweichempfehlungen vor allem auf deren gemeinsames Element – die begleitende Teilbremsung – zurückgehen, die allein bereits den Aufmerksamkeitsfokus zu ändern vermag und den Fahrern mehr Reaktionszeit verschafft.

8. Experiment 3 – Automatisches Ausweichen

8.1. Hintergrund

Gegenstand von Experiment 3 war ein fahrzeuginitiiertes und vom Fahrzeug automatisch durchgeführtes Ausweichmanöver. Dabei sollte das Fahrzeug das Ausweichmanöver entweder nur durch Lenkmomentüberlagerung, oder in Kombination mit einseitig gewichteter Bremsung ausführen. Eine Teilbremsung sollte dieses Manöver begleiten. Eine zusätzlich geschaltete Anzeige sollte den Fahrer auf die drohende Kollision aufmerksam machen und ihm als Hinweis dafür dienen, dass das Fahrzeugverhalten (Bremsung, Lenkmanöver) aus einem absichtlichen Systemeingriff resultiert. Zudem sollte der Einfluss eines Warntons untersucht werden, der ebenfalls die Aufgabe hatte, den Fahrer auf die drohende Kollision aufmerksam zu machen und ihm als Hinweis dafür zu dienen, dass das Fahrzeugverhalten einen absichtlichen Systemeingriff darstellt.

In der Studie sollten die Wirksamkeit und Kontrollierbarkeit eines solchen Systemeingriffs sowohl gegenüber einer unassistierten Kontrollgruppe, als auch im Vergleich zwischen verschiedenen Systemvarianten, als auch im Vergleich zu einer Ausweichempfehlung geprüft werden. Eine Ausweichautomatik würde in der Regel dann zur Anwendung kommen, wenn der Fahrer unaufmerksam ist, deshalb sollte der Fahrer bei Eintreten der kritischen Situation im Experiment abgelenkt sein. Da sowohl aus technischer, wie auch aus rechtlicher Sicht, die Einführung einer Assistenzfunktion, die ein automatisches Ausweichmanöver ausführt, weniger problematisch ist, wenn das Fahrzeug dabei im eigenen Fahrstreifen verbleibt, wurde für den Versuch abermals ein Hindernis mit geringer Eindringtiefe in den Fahrstreifen des Ego-Fahrzeugs gewählt. Um plötzlich erscheinen zu können, wurde auch hier ein von der Seite kommendes Hindernis eingesetzt. Zur Abschätzung der Kontrollierbarkeit eines solchen Systemeingriffs sollte zusätzlich zum berechtigten Eingriff auch eine Falschauslösung getestet werden. Um die Probanden unvorbereitet mit den Prüfzuszenarien konfrontieren zu können, wurde den Probanden zu Beginn des Experiments zunächst ein falscher Versuchsinhalt (coverstory) genannt.

8.2. Vorstudie

In einem mit Rieger durchgeführten Vorversuch (beschrieben in Rieger, Sieber, Siegel, Siedersberger & Färber, 2015), erlebten 48 Probanden ein Ausweichszenario entweder ohne Assistenz, mit einer Ausweichempfehlung (Lenkraddruck, Anzeige), mit einem Eingriff zum automatischen Ausweichen (Trajektorienführung mit adaptiven Lenkradmomenten, Anzeige), oder mit einem Eingriff zum automatischen Ausweichen (s.o.) mit begleitendem Warnton. Begleitende Teilbremsungen fanden nicht statt. Das Ausweichszenario glich vom Aufbau her dem Szenario der berechtigten Auslösung in Ex-

periment 2 (Ausweichempfehlung), allerdings mit höherer TTC (von 1,6 s) beim Erscheinen des Hindernisses. Bei der Hälfte der Probanden war der Gegenfahrstreifen frei, bei der anderen (durch eine Baustellenattrappe) belegt. Jeder Fahrer erlebte das gleiche Szenario mit der gleichen Assistenz einmal bei einer Realfahrt und einmal bei einer Fahrt mit dem VIL-Fahrsimulator (die Reihenfolge wurde durch Alternieren balanciert). Der wahre Versuchsinhalt wurde den Fahrern zunächst verschwiegen und ihnen stattdessen erklärt, der Versuch diene dem Abgleich des Fahrverhaltens in Engstellen zwischen einer Realfahrt und einer Fahrt mit dem VIL-Fahrsimulator. Zur Unterstützung dieser Legende wurden entlang der Versuchsstrecke mehrere mit Verkehrsleitkegeln abgesteckte Gassen aufgestellt und von den Probanden durchfahren. Die Fahrer wurden während der Fahrt nicht abgelenkt. Zusätzlich zur berechtigten Auslösung der verschiedenen Ausweichassistenzen, wurde im Anschluss eine unberechtigte Auslösung der Systeme getestet.

In diesem Vorversuch wurde festgestellt, dass eine Ausweichautomatik im Sinne einer Trajektorienführung durch adaptive Lenkradmomente Wirksamkeit zeigt: Der vom System angestrebte Querversatz von einem Meter nach links wurde bei freiem Gegenfahrstreifen im Mittel erfolgreich hergestellt und das Ausweichmanöver wurde in größerem Abstand zum Hindernis eingeleitet, als in der Kontrollgruppe. Die Fahrer waren zumindest bei der Realfahrt zudem in der Lage, den Systemeingriff bei belegtem Gegenfahrstreifen situationsadäquat abzuschwächen, um Sekundärkollisionen zu vermeiden, der daher in dieser Hinsicht kontrollierbar erscheint. Unterschiede zwischen den Varianten mit und ohne begleitendem Warnton wurden nicht festgestellt. Die Ausweichempfehlung erwies sich im berechtigten Eingriffsfall als ähnlich wirksam wie die Ausweichautomatik. Bei der Falschauslösung trat mit Trajektorienführung teils großer Querversatz auf (im Mittel auf etwa 0,7 m bis 0,8 m gedämpft, in mehreren Fällen jedoch auch Versatz von mehr als 1 m beobachtet), was an der Kontrollierbarkeit des Systems im Vorfeld des Hauptversuchs in dieser Hinsicht Zweifel aufwirft.

8.3. Stichprobe

Am Hauptversuch nahmen 64 Versuchspersonen teil. Die Stichprobe setzte sich aus 50 Männern und 14 Frauen zusammen, die jeweils über eine gültige Fahrerlaubnis der Klasse B verfügten und sich in fahrtüchtigem Zustand befanden. Die Versuchspersonen waren zwischen 19 und 78 Jahre alt ($M = 27.9$, $SD = 12.2$), verfügten über eine Fahrleistung von durchschnittlich 26.800 km ($SD = 21600$) in den vergangenen zwölf Monaten und über eine bisherige Gesamtfahrleistung von durchschnittlich 194.300 km ($SD = 293600$). Keiner der Probanden hatte bereits im Vorfeld Erfahrungen mit CAPLOS.

8.4. Methodik

8.4.1. Messaufbau

In Experiment 3 wurde Versuchsträger 2 (Audi A7 Sportback) genutzt. Die Auslösung der Systemeingriffe und die Aufzeichnung der objektiven Messdaten erfolgte mittels ADTF 2.9. Lenkradwinkel, ABS- und ESP-Eingriffe wurden mit einer Frequenz von 50 Hz, Fahrzeugposition, -beschleunigungen und -drehraten mit einer Frequenz von 100 Hz, Videos von Fahrerportrait, Fahrerfußraum und Fahrscene vor dem Fahrzeug mit einer Bildrate von 25 fps aufgezeichnet. Die Messdatenaufzeichnung wurde in einem Ringspeicher gepuffert und erstreckte sich jeweils über die 5 s vor und die 10 s nach jeder Systemauslösung. Zur Darstellung des Hindernisses wurde CAPLOS verwendet.

8.4.2. Systembeschreibung

Alle Systemeingriffe wurden von einer Teilbremsung begleitet. Hierzu wurde eine Längsverzögerung von 3 ms^{-2} angefordert, die ab Auslösung der Ausweichempfehlung über einen Zeitraum von 200 ms linear aufgebaut, für 1100 ms gehalten, und über weitere 200 ms wieder linear abgebaut wurde.

Als Ausweichempfehlung kam ein Lenkraddruck in Kombination mit einer Anzeige zum Einsatz. Der Lenkraddruck wurde als durch die Elektromotoren der EPS aufgebrachtes Lenkradmoment nach links umgesetzt. Der Lenkraddruck wurde mit einem linearen Anstieg von null auf seine maximale Stärke über 50 ms, einem Halten seiner maximalen Stärke für 500 ms und einem linearen Abfall von seiner maximalen Stärke auf null über weitere 50 ms angefordert. Seine maximale Stärke wirkte sich mit einem Lenkhandmoment von etwa 4,5 Nm aus. Zeitgleich mit dem Lenkraddruck wurde für die Dauer von 2,5 s eine Anzeige geschaltet, die zentral vor dem Fahrer in die Scheibenwurzel eingeblendet wurde (Anzeige „Propritär“, siehe 7.4.2).

Der Eingriff zum automatischen Ausweichen war eine Trajektorienführung, die in Echtzeit adaptiv auf das Fahrerverhalten reagierte und, im Rahmen der Möglichkeiten der Aktorik, versuchte, das Fahrzeug von seiner aktuellen Position mit möglichst sinusförmigem Lenkverlauf in die Zielposition zu manövrieren. Die Zielposition lag auf Höhe des Hindernisses mit einer Ausrichtung parallel zur Fahrbahn und einer Querablage, bei der das Fahrzeug nach rechts einen lateralen Abstand zur Spitze des Hindernisses von etwa 0,6 m und nach links zur Fahrbahnmitte einen lateralen Abstand von etwa 0,1 m hat. Die Trajektorienführung wurde entweder nur über Lenkradmomente umgesetzt, oder über Lenkradmomente und eine laterale Gewichtung der begleitend durchgeführten Teilbremsung. Die Trajektorienführung durch Lenkradmomente und gewichtete Bremsung wurde von einem Warnton begleitet, die Trajektorienführung allein über Lenkradmomente wurde sowohl in einer Variante mit, als auch in einer Variante ohne Warnton getestet. Der Warnton wurde ab Eingriffsbeginn für eine Dauer von 2,5 s eingespielt und bestand hauptsächlich aus den Frequenzen 2, 4, 6 und 14 kHz. Die

Trajektorienführung wurde in allen Fällen von der Anzeige „Ausweichpfeil“ (siehe 7.4.2) begleitet. Die Anzeige wurde ab Eingriffsbeginn für eine Dauer von 5 s eingeblendet.

Somit kamen insgesamt vier Varianten einer Ausweichassistentz, davon drei Ausweichautomatiken, zum Einsatz:

- Ausweichempfehlung: Teilbremsung, Lenkraddruck, Anzeige „Proprietär“
- Ausweichautomatik A: Teilbremsung, Trajektorienführung mit Lenkradmomenten, Anzeige „Ausweichpfeil“
- Ausweichautomatik B: Teilbremsung, Trajektorienführung mit Lenkradmomenten, Anzeige „Ausweichpfeil“, Warnton
- Ausweichautomatik C: Teilbremsung, Trajektorienführung mit Lenkradmomenten und lateral gewichteter Bremsung, Anzeige „Ausweichpfeil“, Warnton

Die fünfte Probandengruppe erhielt keine Assistenz.

8.4.3. Versuchsszenarien, -strecke und -material

Die Studie wurde auf dem für den öffentlichen Verkehr gesperrten Testgelände der Universität der Bundeswehr München durchgeführt. Die Versuchsstrecke verfügte über je einen Fahrstreifen pro Fahrtrichtung mit einer Breite von 3,1 m. An einem geraden Streckenabschnitt wurde am rechten Fahrbahnrand CAPLOS (s. Kapitel 5.2) aufgestellt und durch einen mit Planen verkleideten Aufbau aus handelsüblichen Bauzäunen getarnt (vergleiche Abbildung 48). CAPLOS wurde so eingerichtet, dass die Hindernisattrappe im ausgefahrenen Zustand mit ihrem äußersten Punkt 0,6 m in den Fahrstreifen des Ego-Fahrzeugs vordrang.



Abbildung 48: CAPLOS im ein- (links) und ausgefahrenen (rechts) Zustand bei einem Fahrversuch zur Ausweichautomatik (Experiment 3)

Am linken Fahrbahnrand waren in Abständen von jeweils etwa 45 m Schilder aufgestellt (davon eines 16 m vor und eines 29 m hinter CAPLOS), die zur Fahrtrichtung um 45° verdreht und mit jeweils einem Satz bedruckt waren (s. Abbildung 49). In Kombination mit der geringen Buchstabenhöhe von 25 mm waren die Schilder in der Vorbeifahrt für den Fahrer in der Regel erst dann vollständig lesbar, wenn sie aus dessen Blickwinkel die A-Säule passiert hatten und im Seitenfenster sichtbar waren. Die auf-

gedruckten Sätze waren dabei einfach, aber nicht zwingend sinnhaft, um ein logisches Vervollständigen der Sätze ohne Lesen zu erschweren. Jeweils 2 m vor jedem Schild wurde in der Fahrbahnmitte ein Verkehrsleitkegel aufgestellt.



Abbildung 49: Nebenaufgabe - Lesen klein bedruckter Schilder am linken Fahrbahnrand

8.4.3.1. Szenario „berechtigte Auslösung“

Die Probanden fuhren im Ego-Fahrzeug ohne Nutzung des Tempomats mit einer Geschwindigkeit von etwa 50 kmh^{-1} . Dabei war es ihre Aufgabe, die auf den am linken Fahrbahnrand aufgestellten Schildern gedruckten Sätze so früh wie möglich laut vorzulesen. Im Verlauf der Annäherung an CAPLOS wurde bei einer TTC von 1,6 s das Funksignal zum Ausfahren des Hindernisses gesendet (das sich in Folge bei einer TTC von etwa 1,25 s erstmals für die Probanden sichtbar bewegte). Die von CAPLOS in die Fahrbahn eingebrachte Fahrzeugattrappe ragte in ihrer Endposition 0,6 m in den Fahrstreifen des Ego-Fahrzeugs. Bei einer TTC von 1,2 s wurde (mit Ausnahme der Kontrollgruppe) ein Systemeingriff angefordert. Der Gegenfahrstreifen war frei. Siehe Abbildung 50.

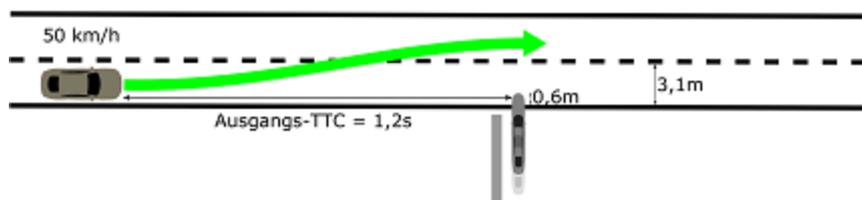


Abbildung 50: Szenario "berechtigte Auslösung" (Experiment 3a)

8.4.3.2. Szenario „unberechtigte Auslösung“

Die Probanden fuhren im Ego-Fahrzeug ohne Nutzung des Tempomats mit einer Geschwindigkeit von etwa 50 kmh^{-1} . Nach Passieren eines Verkehrsleitkegels löste der Versuchsleiter manuell den Systemeingriff einer Ausweichautomatik aus. Der Gegenfahrstreifen war frei. Siehe Abbildung 51.



Abbildung 51: Szenario "unberechtigte Auslösung" (Experiment 3b)

8.4.4. Versuchsdesign

Das Experiment gründete auf einem vollständigen 5 (Art der Ausweichassistenz im Szenario „berechtigte Auslösung“) x 3 (Variante der Ausweichautomatik im Szenario „unberechtigte Auslösung“) Intersubjekt-Design mit Messwiederholung.

8.4.4.1. Teilexperiment 3a - Nutzenfall

Die in Teilexperiment 3a verwendete UV ist mit ihren fünf Ausprägungen in Tabelle 32 aufgeführt. Die in Teilexperiment 3a verwendeten AV sind in Tabelle 33 aufgeführt.

Tabelle 32: Unabhängige Variablen (UV) im Teilexperiment 3a

UV	Ausprägungen	Erhebungsart
<i>Assistenzvariante</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Assistenz • Ausweichempfehlung • Ausweichautomatik A (Lenkradmomente) • Ausweichautomatik B (Lenkradmomente, Warnton) • Ausweichautomatik C (Lenkradmomente, einseitige Bremsung, Warnton) 	Intersubjekt

Auf Unterschiede zwischen den Assistenzvarianten bezüglich der Angemessenheit des Eingriffszeitpunkts und der Akzeptanz des Systemeingriffs wurde mithilfe des Kruskal-Wallis-Tests geprüft. Auf Unterschiede zwischen den Assistenzvarianten bezüglich der Häufigkeiten des Bemerkens der Systemkomponenten, der Primärkollisionen, des Verlassens der Fahrbahn, des Einhaltens des Sicherheitsabstands, der ESC-Eingriffe, des Befahrens des Gegenfahrstreifens, des (tiefen) Eindringens in den Gegenfahrstreifen, der ABS-Eingriffe und der starken Bremsungen wurde jeweils mithilfe des Pearson- χ^2 -Tests geprüft. Auf Unterschiede zwischen den Assistenzvarianten bezüglich des maximalen Querversatzes, des Querabstands zum Hindernis, des Längsabstands beim Herstellen des Sicherheitsabstands, der TTC beim Herstellen des Sicherheitsabstands, der Abweichung von der Idealtrajektorie, der maximalen Querbefleunigung und der maximalen Längsverzögerung wurde jeweils mithilfe einer einfaktoriellen zweiseitigen ANOVA geprüft. Alle Hypothesentests legten ein Signifikanzniveau von $\alpha = 5\%$ zu Grunde.

Tabelle 33: Abhängige Variablen (AV) im Teilerperiment 3a

AV	[AV]	Operationalisierung
<i>Angemessenheit Eingriffszeitpunkt</i>	-	Anhang K: Fragebogen 3.2
<i>Akzeptanz des Systemeingriffs</i>	-	Anhang K: Fragebogen 3.2
<i>Bemerken der Anzeige</i>	-	Anhang K: Fragebogen 3.2
<i>Interpretation der Anzeige</i>	-	Anhang K: Fragebogen 3.2
<i>Bemerken des Lenkeingriffs</i>	-	Anhang K: Fragebogen 3.2
<i>Interpretation des Lenkeingriffs</i>	-	Anhang K: Fragebogen 3.2
<i>Bemerken des Warntons</i>	-	Anhang K: Fragebogen 3.2
<i>Akzeptanz des Systemeingriffs</i>	-	Anhang K: Fragebogen 3.2
<i>Primärkollision</i>	-	Zusammenstoß von Ego-Fahrzeug und Hindernis
<i>Verlassen der Fahrbahn</i>	-	Überfahren der Fahrbahnbegrenzungslinien
<i>Maximaler Querversatz</i>	1 m	Maximaler Versatz nach links (gemessen Mitte Hinterachse) während des Ausweichmanövers
<i>Querabstand zum Hindernis</i>	1 m	Laterale Distanz zwischen rechter vorderer Fahrzeugecke und Spitze des Hindernisses beim Passieren oder Erreichen des Stillstands
<i>Einhalten Sicherheitsabstand</i>	-	Herstellen eines Querabstands zum Hindernis von mindestens 0,5 m vor dem Passieren
<i>Längsabstand beim Herstellen des seitlichen Sicherheitsabstands</i>	1 m	Longitudinale Distanz zum Hindernis beim erstmaligen Herstellen des Sicherheitsabstands
<i>TTC beim Herstellen des seitlichen Sicherheitsabstands</i>	1 s	Zeitliche Distanz zum Hindernis beim erstmaligen Herstellen des Sicherheitsabstands
<i>Abweichung von Idealtrajektorie</i>	1 m	Mittlere betragliche Querabweichung des gemessenen Fahrverlaufs (gemessen Mitte Hinterachse) von einer Bahnkurve zwischen der Ego-Position bei Anforderung des Hindernisses und der von der Ausweichautomatik angestrebten Zielposition unter Annahme eines sinusförmigen Lenkverlaufs
<i>Maximale Querb beschleunigung</i>	1 ms ⁻²	Maximale betragliche Querb beschleunigung während des Ausweichmanövers
<i>ESC-Eingriff</i>	-	Auftreten eines Eingriffs der ESC
<i>Befahren des Gegenfahrstreifens</i>	-	Überfahren der Fahrbahnmittenmarkierung mit der linken vorderen Fahrzeugecke
<i>Eindringen in den Gegenfahrstreifen</i>	-	Überfahren der Fahrbahnmittenmarkierung mit der hinteren linken Fahrzeugecke
<i>Tiefes Eindringen in den Gegenfahrstreifen</i>	-	Linkes vorderes Fahrzeugheck erreicht eine Position mindestens 0,55 m links der Fahrbahnmitte
<i>Maximale Verzögerung</i>	1 ms ⁻²	Minimale Längsb beschleunigung während des Manövers
<i>ABS-Eingriff</i>	-	Auftreten eines Eingriffs des ABS
<i>Starke Bremsung</i>	-	Auftreten einer maximalen Verzögerung von mind. 7 ms ⁻²

8.4.4.2. Teilexperiment 3b – Falschauslösung

Die in Teilexperiment 3b verwendeten UV sind in Tabelle 34 aufgeführt. Die verwendeten AV sind in Tabelle 35 aufgeführt.

Tabelle 34: Unabhängige Variablen (UV) im Teilexperiment 3b

UV	Ausprägungen	Erhebungsart
<i>Assistenzvariante</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Ausweichautomatik A (Lenkradmomente) • Ausweichautomatik B (Lenkradmomente, Warnton) • Ausweichautomatik C (Lenkradmomente, einseitige Bremsung, Warnton) 	Intersubjekt

Tabelle 35: Abhängige Variablen (AV) im Teilexperiment 3b

AV	[AV]	Operationalisierung
<i>Empfundene Beeinträchtigung</i>	-	Probandenurteil auf SBS
<i>Akzeptanz des Systemeingriffs</i>	-	Anhang L: Fragebogen 3.3
<i>Maximaler Querversatz</i>	1 m	Maximaler Versatz nach links (gemessen Mitte Hinterachse) zur Ausgangsquerauflage im Zeitraum von der Anforderung des Systemeingriffs bis 2,5 s danach
<i>Befahren des Gegenfahrstreifens</i>	-	Überfahren der Fahrbahnmittenmarkierung
<i>Maximale Verzögerung</i>	1 ms ⁻²	Minimale Längsbeschleunigung im Zeitraum von der Anforderung des Systemeingriffs bis 2,5 s danach
<i>Starke Bremsung</i>	-	Auftreten einer maximalen Verzögerung von mindestens 7 ms ⁻²

Auf Unterschiede zwischen den Assistenzvarianten bezüglich der Beeinträchtigung der Fahraufgabe und der Akzeptanz des Systemeingriffs wurde unter Verwendung des Kruskal-Wallis-Tests geprüft. Auf Unterschiede zwischen den Assistenzvarianten bezüglich der Häufigkeit des Befahrens des Gegenfahrstreifens sowie der Häufigkeit des Auftretens starker Bremsungen wurde jeweils unter Verwendung des Pearson- χ^2 -Tests geprüft. Auf Unterschiede zwischen den Assistenzvarianten bezüglich des maximalen Querversatzes oder der maximalen Längsverzögerung wurde jeweils unter Verwendung einer zweiseitigen, einfaktoriellen ANOVA getestet. Alle Tests legten ein Signifikanzniveau von $\alpha = 5\%$ zu Grunde.

8.4.5. *Versuchsablauf*

Die Probanden füllten zunächst einen Fragebogen zu Fahrgewohnheiten und -erfahrung (Anhang J: Fragebogen 3.1) aus. Im Anschluss fand die Fahrzeuggewöhnung (Sitz-, Spiegel- und Lenkrad-Einstellung und eine standardisierte Serie von Fahrmanövern zum Kennenlernen von Beschleunigungs-, Brems- und Lenkverhalten sowie der Fahrzeugabmessungen) statt. Den Probanden wurden eingangs falsche Informationen zum Versuchsinhalt gegeben.

Danach folgte Versuchsteil 3a (Nutzenfall), in dem die Probanden mit dem Szenario „berechtigte Auslösung“ konfrontiert wurden. Nach Bewältigung der Situation wurden die Probanden über den wahren Versuchsinhalt aufgeklärt. Sie bewerteten dann die erlebte Fahrsituation und die erlebte Ausweichassistenz (Anhang K: Fragebogen 3.2).

Im Anschluss gab der Versuchsleiter vor, angeblich falsche Messwerte zu registrieren. Er bat den Probanden, zur Überprüfung dieser Beobachtung, die Versuchsstrecke erneut mit 50 kmh^{-1} möglichst mittig im Fahrstreifen abzufahren. Während dieser Fahrt wurden die Probanden mit dem Szenario „unberechtigte Auslösung“ (Versuchsteil 3b, Falschauslösung) konfrontiert. Auch die Falschauslösung wurde von den Probanden bewertet (Anhang L: Fragebogen 3.3).

8.5. Ergebnisse

8.5.1. *Teilexperiment 3a – Nutzenfall*

Aufgrund der geringen Überlappung (weniger als 5 cm) zwischen dem hypothetisch mittig im Fahrstreifen fahrenden Ego-Fahrzeug und dem voll ausgefahrenen Hindernis, ist die tatsächliche Startposition des Ego-Fahrzeugs im Fahrstreifen zu Beginn der kritischen Situation für das Zustandekommen von Kollisionen von großer Bedeutung. Bei allen Probanden befand sich das Ego-Fahrzeug zu diesem Zeitpunkt innerhalb der Fahrstreifengrenzen. Bei 48,2 % der Probanden befand sich das Ego-Fahrzeug zu diesem Zeitpunkt im kollisionsgefährdeten Bereich, also etwa mittig im Fahrstreifen oder davon nach rechts versetzt (vgl. Abbildung 52). Dennoch kam es in keiner Versuchsbedingung zu einer Kollision mit dem Hindernis. Dies ist mitunter darauf zurückzuführen, dass selbst in der Kontrollgruppe ohne Assistenz alle Probanden (100 %) vor Erreichen des Hindernisses sowohl eine Brems- (Betätigen des Bremspedals) als auch eine Lenkreaktion (Herstellen eines Lenkradwinkels von mehr als 5° nach links) zeigten.

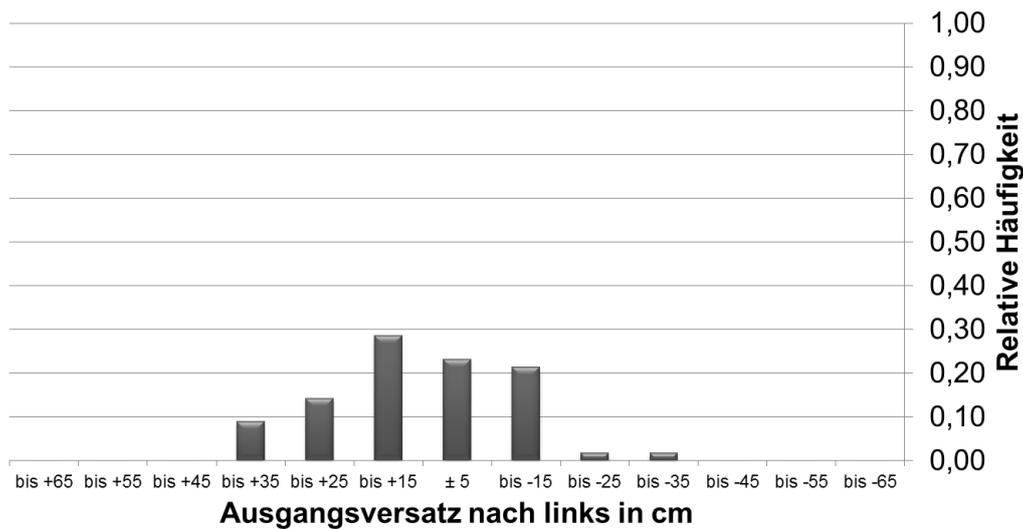


Abbildung 52: Histogramm der Ausgangsquerablage zur Fahrstreifenmitte im Szenario "berechtigte Auslösung" (Experiment 3a)

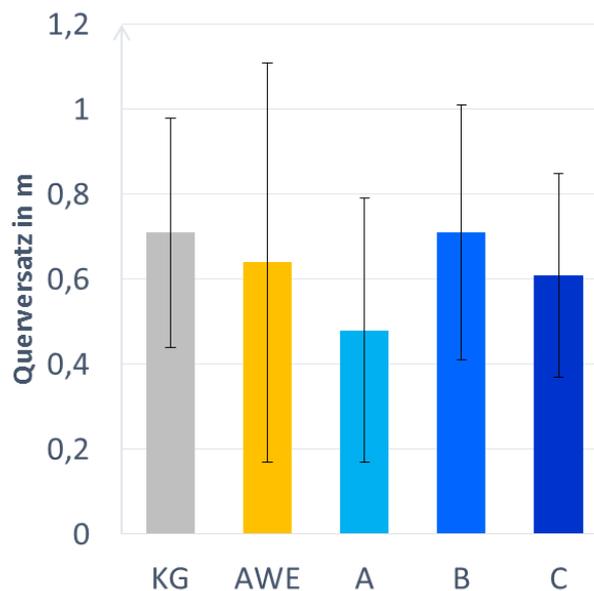


Abbildung 53: Maximal hergestellter Querversatz beim Ausweichen für die Kontrollgruppe (KG), Ausweichempfehlung (AWE) und die Ausweichautomatiken A (Lenkradmomente ohne Warnton), B (Lenkradmomente mit Warnton) und C (Lenkradmomente mit einseitiger Bremsung und Warnton). Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung

Der in den einzelnen Versuchsbedingungen maximal hergestellte Querversatz ist in Abbildung 53 angetragen. Die Unterschiede sind nicht statistisch signifikant, $F(4, 51) = 0,99$, $p = .42$. Von der Ausweichautomatik durchschnittlich angestrebt waren 0,57 m (A), 0,65 m (B) und 0,62 m (C).

Der seitliche Abstand zum Hindernis in den einzelnen Versuchsbedingungen ist in Abbildung 54 angetragen. Die Unterschiede sind nicht statistisch signifikant, $F(4, 51) = 0,97$, $p = .43$.

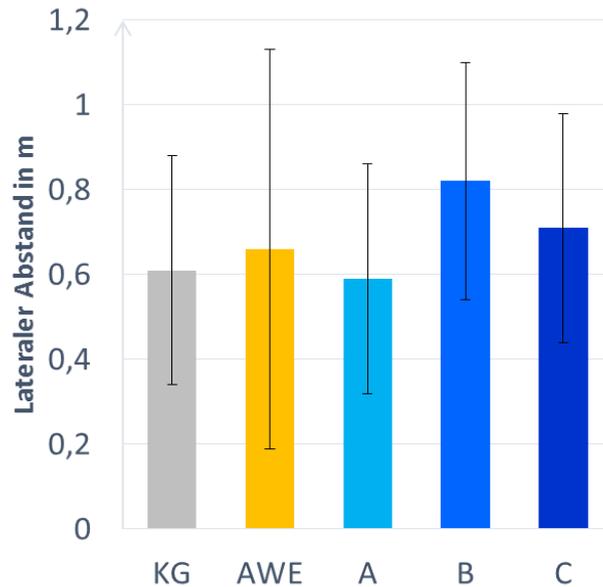


Abbildung 54: Lateraler Abstand zum Hindernis beim Passieren beim Ausweichen für die Kontrollgruppe (KG), Ausweichempfehlung (AWE) und die Ausweichautomatiken A (Lenkradmomente ohne Warnton), B (Lenkradmomente mit Warnton) und C (Lenkradmomente mit einseitiger Bremsung und Warnton). Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung

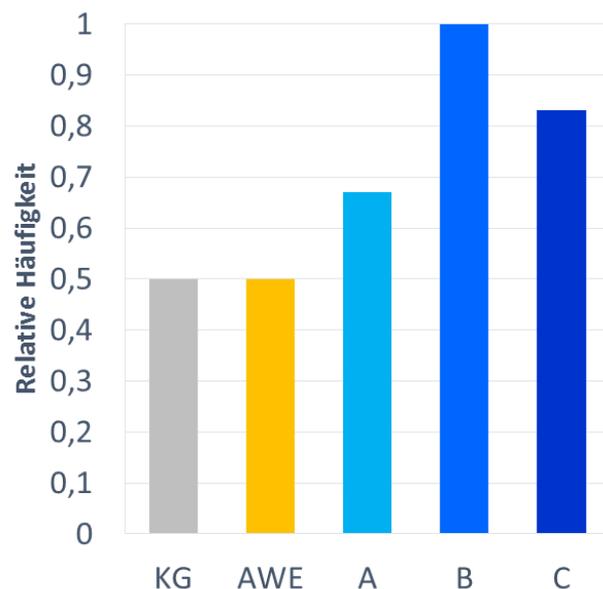


Abbildung 55: Relative Häufigkeit des Herstellens von 0,5 m lateralem Sicherheitsabstand zum Hindernis beim Ausweichen für die Kontrollgruppe (KG), Ausweichempfehlung (AWE) und die Ausweichautomatiken A (Lenkradmomente ohne Warnton), B (Lenkradmomente mit Warnton) und C (Lenkradmomente mit einseitiger Bremsung und Warnton)

Die relative Häufigkeit, mit der in den einzelnen Versuchsbedingungen im Verlauf des Ausweichmanövers ein lateraler Sicherheitsabstand von mindestens 0,5 m zum Hindernis hergestellt wurde, ist in Abbildung 55 angetragen. Die Unterschiede sind statistisch signifikant, $\chi^2(4, N=56) = 9.49, p = .05$: Mit Ausweichautomatik B wurde ein Sicherheitsabstand signifikant häufiger hergestellt, als ohne Assistenz, $\chi^2(1, N=22) = 6.88, p = .009$.

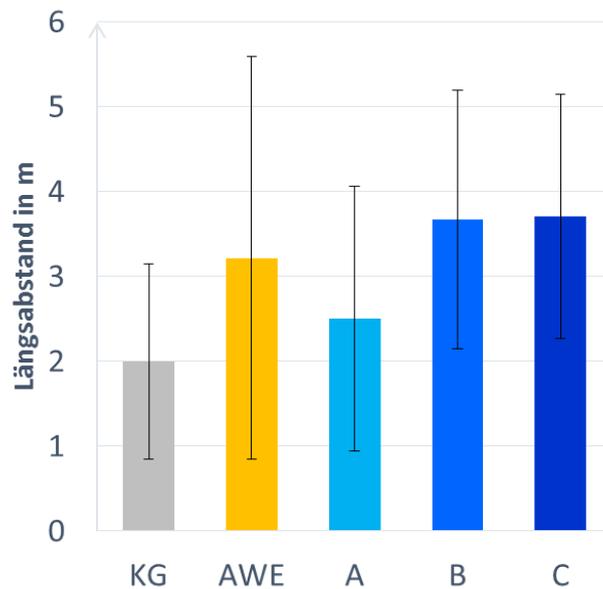


Abbildung 56: Längsabstand beim Herstellen eines seitlichen Sicherheitsabstandes von 0,5 m zum Hindernis beim Ausweichen für die Kontrollgruppe (KG), Ausweichempfehlung (AWE) und die Ausweichautomatiken A (Lenkradmomente ohne Warnton), B (Lenkradmomente mit Warnton) und C (Lenkradmomente mit einseitiger Bremsung und Warnton). Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung

Der Längsabstand zum Hindernis beim Herstellen des lateralen Sicherheitsabstandes ist in Abbildung 56 angetragen. Es zeigten sich keine statistisch signifikanten Unterschiede, $F(4, 34) = 1.69, p = .18$.

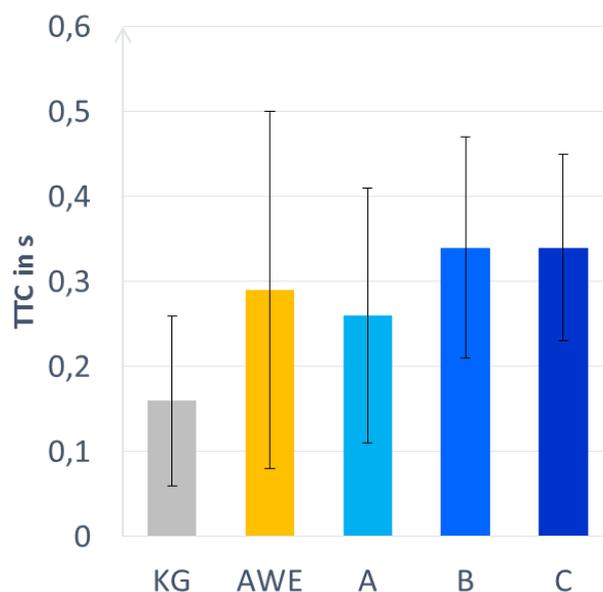


Abbildung 57: TTC beim Herstellen eines seitlichen Sicherheitsabstandes von 0,5 m zum Hindernis beim Ausweichen für die Kontrollgruppe (KG), Ausweichempfehlung (AWE) und die Ausweichautomatiken A (Lenkradmomente ohne Warnton), B (Lenkradmomente mit Warnton) und C (Lenkradmomente mit einseitiger Bremsung und Warnton). Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung

Die TTC beim erstmaligen Herstellen des seitlichen Sicherheitsabstandes ist in Abbildung 57 angetragen. Es zeigten sich keine statistisch signifikanten Unterschiede auf, $F(4, 34) = 1.96, p = .13$.

Die mittlere Abweichung von der Idealtrajektorie in den einzelnen Versuchsbedingungen ist in Abbildung 58 angetragen. Es zeigte sich ein statistisch signifikanter Haupteffekt der Assistenz, $F(4, 51) = 3.78$, $p = .009$: Post-hoc erweist sich die mittlere Abweichung von der Idealtrajektorie mit Ausweichautomatik C als statistisch signifikant geringer als ohne Assistenz, $p = .04$.

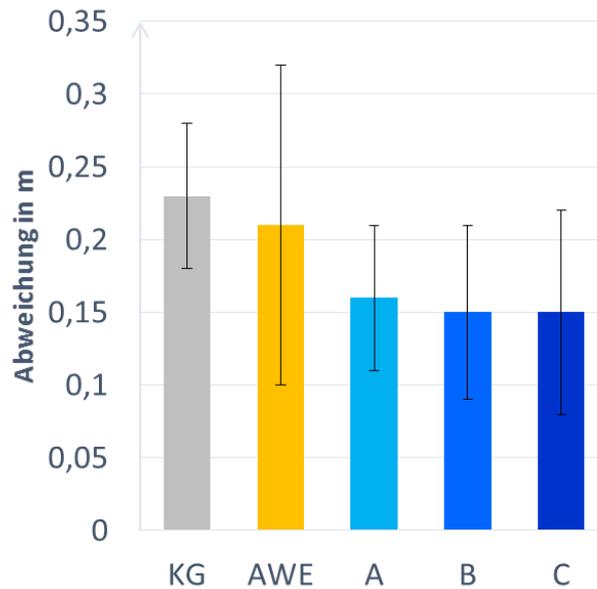


Abbildung 58: Mittlere betragliche Abweichung von der Idealtrajektorie beim Ausweichen für die Kontrollgruppe (KG), Ausweichempfehlung (AWE) und die Ausweichautomatiken A (Lenkradmomente ohne Warnton), B (Lenkradmomente mit Warnton) und C (Lenkradmomente mit einseitiger Bremsung und Warnton). Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung

Die im Verlauf des Manövers aufgetretene maximale Querbewegung ist für die einzelnen Versuchsbedingungen in Abbildung 59 angetragen. Die beobachteten Werte wiesen statistisch signifikante Unterschiede auf, $F(4, 51) = 5.97$, $p = .01$. Post-hoc erwies sich die maximale Querbewegung bei den Fahrten mit Ausweichautomatik A als geringer, als bei den Fahrten ohne Assistenz, $p = .006$.

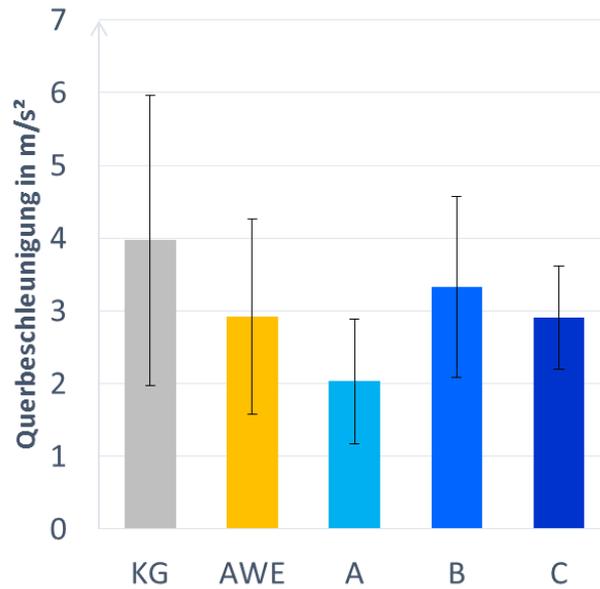


Abbildung 59: Maximale Querbeschleunigung beim Ausweichen für die Kontrollgruppe (KG), Ausweichempfehlung (AWE) und die Ausweichautomatiken A (Lenkradmomente ohne Warnton), B (Lenkradmomente mit Warnton) und C (Lenkradmomente mit einseitiger Bremsung und Warnton). Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung

Die maximale Längsverzögerung im Verlauf des Manövers ist für die einzelnen Versuchsbedingungen in Abbildung 60 angetragen. Die Unterschiede sind statistisch nicht signifikant, $F(4, 51) = 0.30, p = .88$.

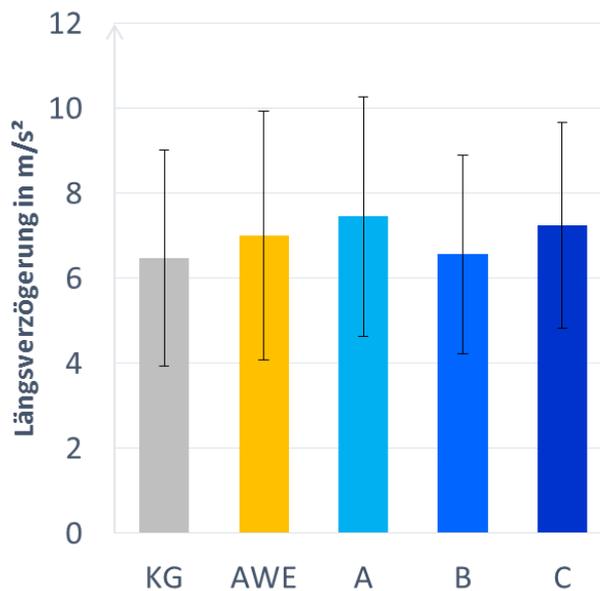


Abbildung 60: Maximale Längsverzögerung beim Ausweichen für die Kontrollgruppe (KG), Ausweichempfehlung (AWE) und die Ausweichautomatiken A (Lenkradmomente ohne Warnton), B (Lenkradmomente mit Warnton) und C (Lenkradmomente mit einseitiger Bremsung und Warnton). Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung

Die empfundene Angemessenheit des Eingriffszeitpunkts der Assistenz ist für die einzelnen Versuchsbedingungen mit Systemeingriff in Tabelle 36 angetragen. Die Unterschiede sind statistisch nicht signifikant, $H(3, N=41) = 1.16, p = .76$.

Tabelle 36: Fahrerurteile zur Angemessenheit des Eingriffszeitpunkts der Ausweichassistenz für die Ausweichempfehlung (AWE) und die Ausweichautomatiken A (Lenkradmomente ohne Warnton), B (Lenkradmomente mit Warnton) und C (Lenkradmomente mit einseitiger Bremsung und Warnton)

	zu früh	eher zu früh	genau richtig	eher zu spät	zu spät
AWE	0 %	11 %	56 %	22 %	11 %
A	0 %	9 %	45 %	36 %	9 %
B	0 %	0 %	70 %	30 %	0 %
C	0 %	9 %	73 %	9 %	9 %

Tabelle 37 gibt die relativen Häufigkeiten des Befahrens des Gegenfahrstreifens mit der Fahrzeugfront, $\chi^2(4, N=56) = 5.42, p = .25$, oder gar dem Fahrzeugheck, $\chi^2(4, N=56) = 2.40, p = 0.66$, an, sowie für ein tiefes Eindringen in den Gegenfahrstreifen, $\chi^2(4, N=56) = 2.71, p = .61$, das Auftreten eines ESC-Eingriffs, $\chi^2(4, N=56) = 3.73, p = 0.44$, das Auftreten eines ABS-Eingriffs, $\chi^2(4, N=56) = 0.94, p = .92$, oder das Auftreten einer starken Bremsung, $\chi^2(4, N=56) = 1.12, p = .89$. Die Unterschiede sind statistisch nicht signifikant.

Tabelle 37: Relative Häufigkeiten für das Eindringen in den Gegenfahrstreifen, sowie das Auftreten von ABS- oder ESC-Eingriffen oder starken Bremsungen für die Kontrollgruppe (KG), Ausweichempfehlung (AWE) und die Ausweichautomatiken A (Lenkradmomente ohne Warnton), B (Lenkradmomente mit Warnton) und C (Lenkradmomente mit einseitiger Bremsung und Warnton)

	KG	AWE	AWA A	AWA B	AWA C
Mit Front in Gegenfahrstreifen	67%	40%	33%	70%	67%
Mit Heck in Gegenfahrstreifen	58%	40%	33%	60%	50%
Tief im Gegenfahrstreifen	8%	25%	0%	11%	9%
ESC-Eingriff	8%	0%	0%	0%	0%
ABS-Eingriff	33%	50%	42%	40%	50%
Starke Bremsung	42%	50%	42%	40%	58%

Die relativen Häufigkeiten des Bemerkens der Anzeige, des Lenkeingriffs und des Warntons, sowie in Klammern die relativen Häufigkeiten des Bemerkens der Anzeige, des Lenkeingriffs und des Warntons, sind in Tabelle 38 angegeben. Die Werte in Klammern geben die relative Häufigkeit an, in der die Systemkomponente jeweils früher bemerkt wurde, als das Hindernis. Ob die Systemkomponente gar nicht, vor oder nach dem Bemerkens des Hindernisses bemerkt wurde, war zwischen den Systemvarianten weder für die Anzeige, $\chi^2(6, N=44) = 9.45, p = .15$, noch für den Lenkeingriff,

$\chi^2(6, N=43) = 6.25, p = .40$, oder den Warnton, $\chi^2(2, N=22) = 1.21, p = .55$, statistisch signifikant unterschiedlich.

Tabelle 38: Relative Häufigkeiten für das Bemerkn von Anzeige, Lenkeingriff und Warnton für die Ausweichempfehlung (AWE) und die Ausweichautomatiken A (Lenkradmomente ohne Warnton), B (Lenkradmomente mit Warnton) und C (Lenkradmomente mit einseitiger Bremsung und Warnton). Zahlen in Klammern geben den Anteil an, zu dem die Komponente subjektiv vor dem Hindernis wahrgenommen wurde

	AWE	A	B	C
Anzeige bemerkt	50% (30%)	67% (25%)	10% (0%)	33% (8%)
Lenkeingriff bemerkt	70% (30%)	67% (33%)	100% (20%)	82% (27%)
Warnton bemerkt	-	-	80% (60%)	58% (42%)

Die der Anzeige subjektiv zugemessene Bedeutung ist für die einzelnen Versuchsbedingungen mit Ausweichassistenz in Tabelle 39 angetragen.

Tabelle 39: Relative Häufigkeiten der Interpretationen der Anzeige für die Ausweichempfehlung (AWE) und die Ausweichautomatiken A (Lenkradmomente ohne Warnton), B (Lenkradmomente mit Warnton) und C (Lenkradmomente mit einseitiger Bremsung und Warnton)

	Ausweichempfehlung	Hinweis auf automatisches Ausweichen	Kollisionswarnung	unspezifische Warnung	Sonstiges
AWE	0 %	0 %	40 %	60 %	0 %
A	38 %	50 %	0 %	13 %	0 %
B	100 %	0 %	0 %	0 %	0 %
C	25 %	50 %	25 %	0 %	0 %

Die dem Lenkeingriff subjektiv zugemessene Bedeutung ist für die einzelnen Versuchsbedingungen mit Ausweichassistenz in Tabelle 40 angetragen.

Tabelle 40: Relative Häufigkeiten der Interpretationen des Lenkeingriffs für die Ausweichempfehlung (AWE) und die Ausweichautomatiken A (Lenkradmomente ohne Warnton), B (Lenkradmomente mit Warnton) und C (Lenkradmomente mit einseitiger Bremsung und Warnton)

	Ausweichempfehlung	Ausweichehilfe	Ausweichautomatik	Sonstiges
AWE	29 %	0 %	71 %	0 %
A	25 %	25 %	50 %	0 %
B	0 %	10 %	90 %	0 %
C	22 %	0 %	78 %	0 %

Die Akzeptanz des Systemeingriffs ist für die einzelnen Versuchsbedingungen mit Systemeingriff in Tabelle 41 angetragen. Die Unterschiede sind statistisch nicht signifikant, $H(3, N=41) = 4.16, p = .25$.

Tabelle 41: Relative Häufigkeiten der Fahrerurteile zur Akzeptanz des Systemeingriffs für die Ausweichempfehlung (AWE) und die Ausweichautomatiken A (Lenkradmomente ohne Warnton), B (Lenkradmomente mit Warnton) und C (Lenkradmomente mit einseitiger Bremsung und Warnton)

	überhaupt nicht akzeptabel	eher nicht akzeptabel	unentschieden	eher akzeptabel	voll akzeptabel
AWE	0 %	11 %	11 %	22 %	46 %
A	0 %	0 %	0 %	36 %	64 %
B	0 %	20 %	10 %	40 %	30%
C	0 %	0 %	0 %	45 %	55 %

8.5.2. Teilexperiment 3b – Falschauslösung

Die empfundene Beeinträchtigung der Fahraufgabe durch die Falschauslösung der Ausweichautomatik ist für die einzelnen Assistenzvarianten in Abbildung 61 angetragen. Die Unterschiede sind statistisch nicht signifikant, $H(2, N=56) = 3.98, p = .14$. Weniger als 15 % aller Urteile fielen in den Bereich „gefährlich“ oder „unkontrollierbar“.

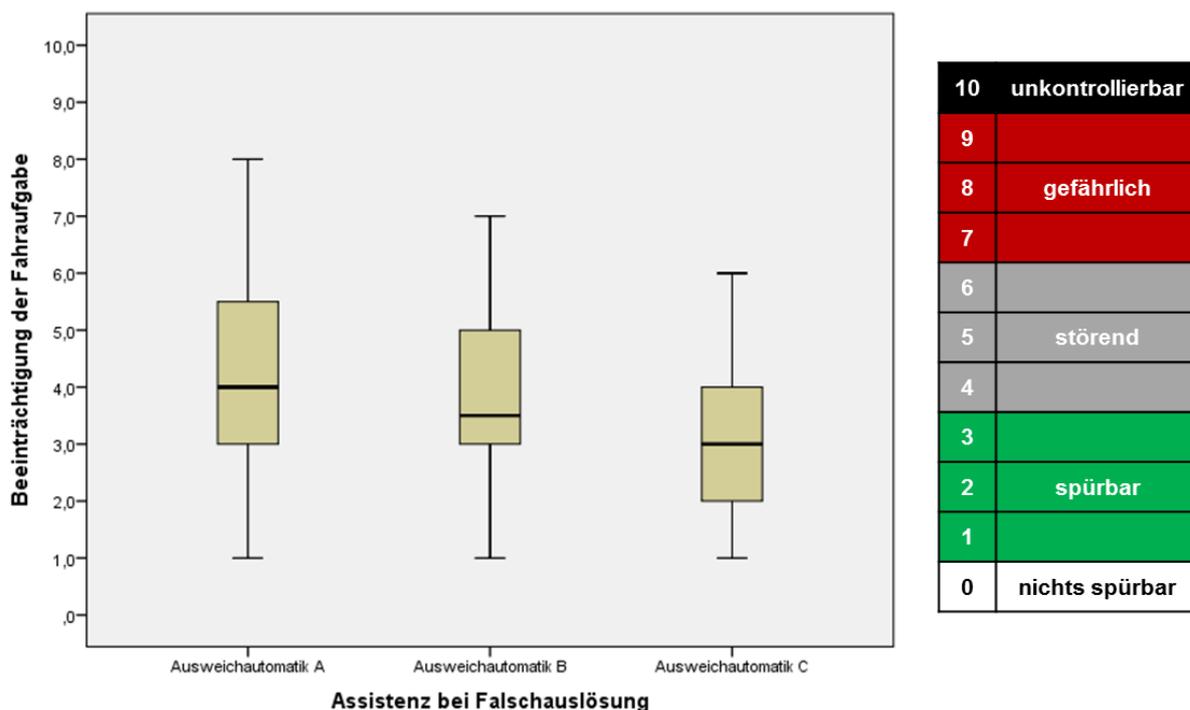


Abbildung 61: Probandenurteile zur Bewertung der Falschauslösung einer Ausweichautomatik auf der SBS

Die Akzeptanzurteile in Bezug auf den Systemeingriff trotz Falschauslösung sind für die einzelnen Varianten der Ausweichautomatik in Tabelle 42 angetragen. Die Unterschiede sind statistisch nicht signifikant, $H(2, N=56) = 2.08, p = 0.35$.

Tabelle 42: Relative Häufigkeiten der Fahrerurteile zur Akzeptanz des Systemeingriffs nach Falschauslösung für die Ausweichautomatiken A (Lenkradmomente ohne Warnton), B (Lenkradmomente mit Warnton) und C (Lenkradmomente mit einseitiger Bremsung und Warnton)

	überhaupt nicht akzeptabel	eher nicht akzeptabel	unentschieden	eher akzeptabel	voll akzeptabel
A	17 %	17 %	30 %	26 %	9 %
B	17 %	0 %	28 %	50 %	6 %
C	13 %	20 %	47 %	7 %	13 %

Der durch die Falschauslösung hergestellte maximale Querversatz ist für die einzelnen Varianten der Ausweichautomatik in Abbildung 62 angetragen. Die Unterschiede sind statistisch nicht signifikant, $F(2, 53) = 2.74, p = .07$). Der vom System durchschnittlich jeweils angestrebte Querversatz war 0,62 m für Ausweichautomatik A, 0,64 m für Ausweichautomatik B und 0,58 m für Ausweichautomatik C.

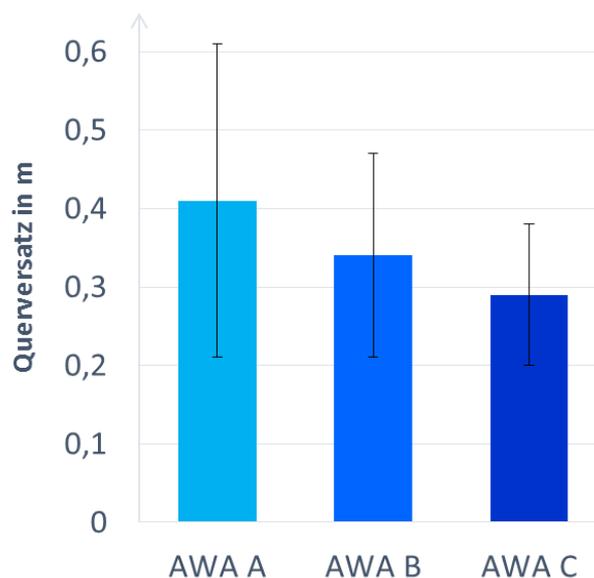


Abbildung 62: Maximal hergestellter Querversatz bei Falschauslösung der Ausweichautomatiken (AWA) A (Lenkradmomente ohne Warnton), B (Lenkradmomente mit Warnton) und C (Lenkradmomente mit einseitiger Bremsung und Warnton). Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung

Mit Ausweichautomatiken B und C wurde nicht, mit Ausweichautomatik A wurde in zwei Fällen in den Gegenfahrstreifen eingedrungen. Die Fahrten, bei denen in Reaktion auf den unberechtigten Systemeingriff der Gegenfahrstreifen befahren wurde, sind in ihren Verläufen dargestellt: Abbildung 63 zeigt einen Fall, in dem die Auswirkungen der Falschauslösung an der Fahrstreifengrenze eigentlich bereits abgefangen ist, das Fahrzeug sich auch bereits fast im Stillstand befindet, als der Fahrer nochmal eine kräftige Lenkbewegung nach links initiiert. Das Gespräch mit dem Fahrer und die Analyse des Videos lassen vermuten, dass es sich hierbei um eine Reaktion handelt, die nur aufgrund der un-

klaren Versuchsbedingungen (angeblicher Messtechniktest, Fahrversuch offiziell bereits abgeschlossen, Fahrstrecke völlig frei von anderen Verkehrsteilnehmern) gewählt wurde und Vergleichbares im Ernstfall voraussichtlich nicht zu erwarten wäre. Andernfalls wäre dieser Fall als sehr gefährlich einzustufen, wie auch der in Abbildung 64 gezeigte Fall, in dem der Fahrer das Fahrzeug zwar abbremste, aber erst inmitten des Gegenfahrstreifens zum Stillstand brachte.

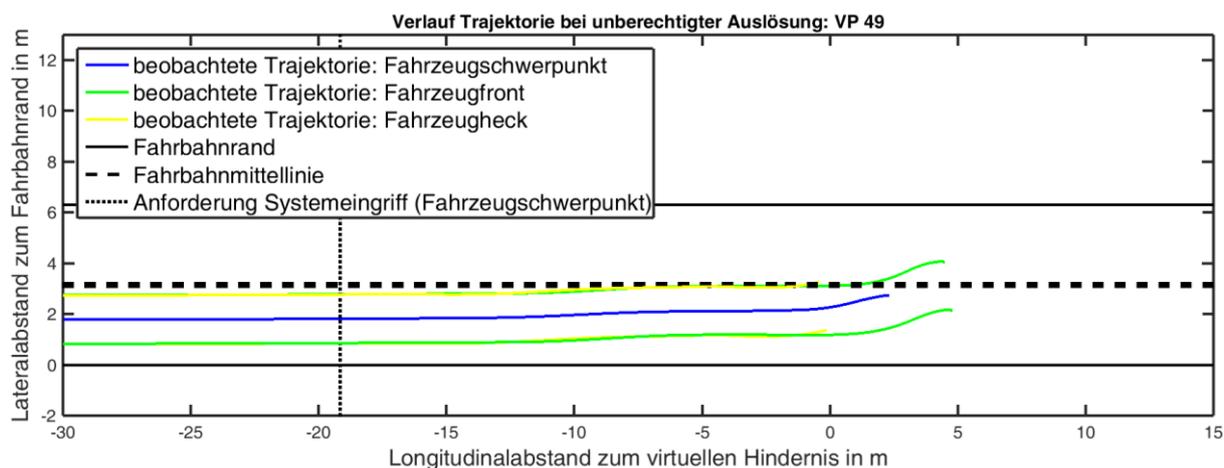


Abbildung 63: Fahrverlauf eines Probanden mit Ausweichautomatik A bei Falschauslösung mit Eindringen in den Gegenfahrstreifen – kontrollierter Fall

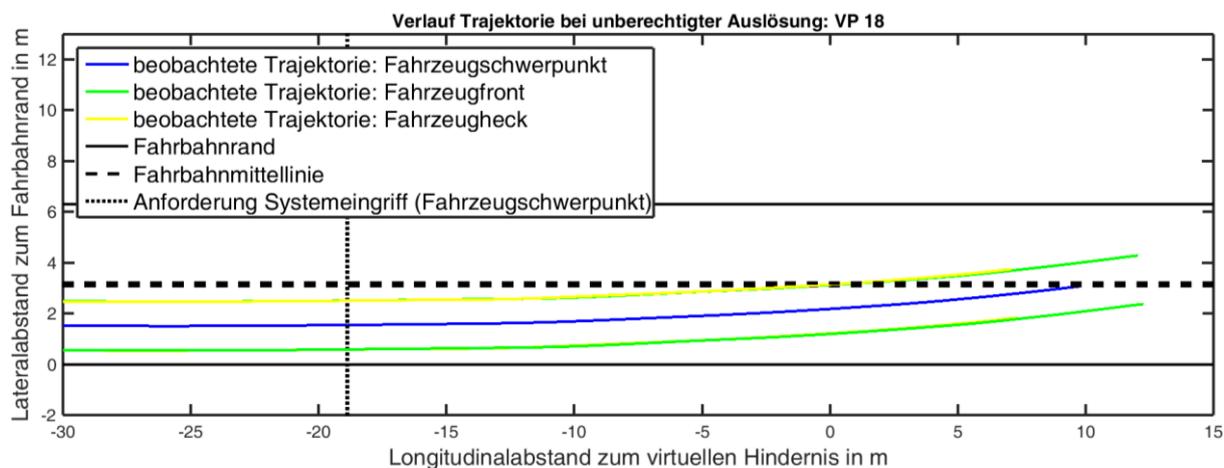


Abbildung 64: Fahrverlauf eines Probanden mit Ausweichautomatik A bei Falschauslösung mit Eindringen in den Gegenfahrstreifen – gefährlicher Fall

Die relative Häufigkeit einer starken Bremsung in Reaktion auf die unberechtigte Systemauslösung betrug 9 % (Ausweichautomatik A), 11 % (Ausweichautomatik B) und 0 % (Ausweichautomatik C). Die Unterschiede sind statistisch nicht signifikant, $\chi^2(2, N=56) = 0.15, p = .87$.

Die in Reaktion auf die unberechtigte Systemauslösung beobachtete maximale Längsverzögerung ist für die einzelnen Varianten der Ausweichautomatik in Abbildung 65 angetragen. Die Unterschiede sind statistisch nicht signifikant, $F(2, 53) = 0.15, p = .87$.

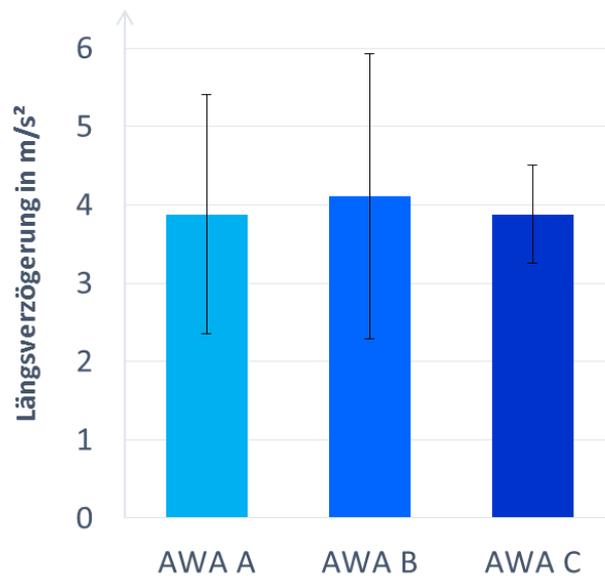


Abbildung 65: Maximale Längsverzögerung bei Falschauslösung der Ausweichautomatiken (AWA) A (Lenkradmomente ohne Warnton), B (Lenkradmomente mit Warnton) und C (Lenkradmomente mit einseitiger Bremsung und Warnton). Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung

8.6. Diskussion

Der Fahrversuch konfrontierte Fahrer, deren Blick zu Beginn der Situation seitlich nach links abgewandt war, mit einem bei geringer TTC erscheinenden, schnell von rechts in die Fahrbahn eindringenden Hindernis mit geringer Überlappung. Überraschenderweise war das Szenario selbst für Fahrer ohne Assistenz gut zu meistern, obwohl die geringen Zeitreserven, gemäß den Erkenntnissen der verfügbaren Literatur, eine geringe Wahrscheinlichkeit für rechtzeitige, korrekte Reaktionen hätten erwarten lassen. Das wirft unter anderem die Frage auf, welche situativen Parameter einer Notausweichsituation das Fahrerverhalten auf welche Weise beeinflussen.

Ein nur geringer Anteil der Fahrer (11 % im Falle der Ausweichempfehlung, je 9 % im Falle der Ausweichautomatiken A und C, 0 % im Falle der Ausweichautomatik B) schätzte den Systemeingriff als „eher zu früh“ ein und lässt damit eine mögliche Bevormundung erkennen. Die große Mehrheit der Fahrer empfand den Zeitpunkt des Systemeingriffs als genau richtig oder als „(eher) zu spät“ – wobei berücksichtigt werden muss, dass der Systemeingriff zeitgleich mit der ersten Sichtbarkeit des Hindernisses angefordert wurde, und nicht früher möglich gewesen wäre. Die Mehrheit der Probanden stufte die Systemeingriffe nach der berechtigten Auslösung als „eher“ bis „voll akzeptabel“ ein.

Eine Wirksamkeit der Ausweichempfehlung in diesem Szenario war, gegenüber der von der Kontrollgruppe hoch angesetzten Messlatte, kaum erkennbar. Ein seitlicher Sicherheitsabstand zum Hindernis wurde genauso häufig eingehalten, wenn auch deskriptiv in diesen Fällen bereits in größerem Längsabstand zum Hindernis hergestellt. Auch bezüglich Aspekten der Kontrollierbarkeit im Nutzenfall

brachte die Ausweichempfehlung keinen erkennbaren Vorteil: Zwar traten im Vergleich zur Kontrollgruppe keine ESC-Eingriffe auf, die maximale Querbeschleunigung war deskriptiv geringer und es wurde deskriptiv seltener der Gegenfahrstreifen befahren, dafür deskriptiv häufiger sehr tief in den Gegenfahrstreifen eingedrungen. Es wurde zudem deskriptiv häufiger stark gebremst und damit der nachfolgende Verkehr potenziell gefährdet. Statistisch signifikante Unterschiede zur Kontrollgruppe wurden nicht beobachtet. Der Lenkraddruck wurde dabei von 70 % der Fahrer bewusst wahrgenommen und unter diesen von der überwiegenden Mehrheit (71 %) als automatisches Ausweichen fehlinterpretiert, was bezüglich der Eignung als Ausweichempfehlung ein schlechtes Urteil ist. Aufgrund des sehr geringen benötigten Querversatzes im Versuchsszenario ist dieser Befund jedoch ein mögliches Artefakt.

Mit der Ausweichautomatik A (Lenkradmomente, kein Warnton) fuhren Probanden durchschnittlich deskriptiv näher am Hindernis vorbei, als unassistierte Fahrer. Dabei stellten die Probanden mit Ausweichautomatik A allerdings deskriptiv häufiger einen angemessenen Sicherheitsabstand her, und dies in den betreffenden Fällen auch in deskriptiv größerem Längsabstand zum Hindernis. Ausweichautomatik A zeigt einen Vorteil bei Aspekten der Kontrollierbarkeit im Nutzenfall: Es wurde deskriptiv seltener und weniger weit in den Gegenfahrstreifen eingedrungen und es trat eine signifikant geringere maximale Querbeschleunigung auf. Entsprechend wurden im Vergleich zur Kontrollgruppe auch keine ESC-Eingriffe beobachtet. Starke Bremsungen traten genauso häufig auf, wie in der Kontrollgruppe.

Mit Ausweichautomatik B (Lenkradmomente, Warnton), die sich von Ausweichautomatik A nur durch einen zusätzlichen Signalton unterscheidet, ergab sich ein anderes Muster: Hier wurde ein deskriptiv größerer Abstand zum Hindernis hergestellt und dabei statistisch signifikant häufiger (nämlich in 100 % der Fälle) ein angemessener Sicherheitsabstand zum Hindernis eingehalten, als in der Kontrollgruppe. Dieser wurde darüber hinaus auch – sowohl was den räumlichen, als auch was den zeitlichen Abstand betrifft – deskriptiv früher hergestellt. Bezüglich der Kontrollierbarkeit im Nutzenfall zeigt sich, dass es im Gegensatz zur Kontrollgruppe zu keinen ESC-Eingriffen kam und die maximale Querbeschleunigung deskriptiv niedriger war. Auch die Häufigkeit einer starken Bremsung war mit Ausweichautomatik B deskriptiv am geringsten. Jedoch wurde deskriptiv am häufigsten der Gegenfahrstreifen befahren.

Für Ausweichautomatik C (Lenkradmomente und einseitig gewichtete Bremsung, Warnton) ergab sich ein ähnliches Bild, wie für Ausweichautomatik B: Das Hindernis wurde durchschnittlich in deskriptiv größerem Abstand passiert, ein angemessener Sicherheitsabstand deskriptiv häufiger und räumlich und zeitlich früher hergestellt, die Abweichung von der Idealtrajektorie (deskriptiv genauso groß wie für Ausweichautomatik B) war sogar statistisch signifikant geringer, als für die Kontroll-

gruppe. Es traten gegenüber der Kontrollgruppe eine deskriptiv niedrigere maximale Querschleunigung, dafür eine deskriptiv höhere maximale Längsverzögerung und die deskriptiv häufigsten starken Bremsungen auf. Der Gegenfahrstreifen wurde deskriptiv in etwa so häufig und tief befahren, wie in der Kontrollgruppe. Während diese Ergebnisse auf eine etwas geringere Wirksamkeit der Ausweichautomatik C gegenüber der Ausweichautomatik B hindeuten, scheint dafür eine bessere Kontrollierbarkeit im Nutzenfall gegeben.

Insgesamt deutete sich die größte Wirksamkeit für Ausweichautomatik B an. Während der vom System angestrebte Querversatz bei Ausweichautomatik A durchschnittlich um 0,09 m und bei Ausweichautomatik C um 0,01 cm verfehlt wurde, wurden bei Ausweichautomatik B durchschnittlich sogar 0,06 cm mehr Querversatz hergestellt, als vom System angestrebt, was in Anbetracht des knapp bemessenen angestrebten Versatzes und des ausreichend vorhandenen Manövrierraumes vorteilhaft erscheint. Während die Anzeige bei Ausweichautomatik B deskriptiv seltener bemerkt wurde als bei den anderen Assistenzvarianten, wurden Lenkeingriff und Warnton hier deskriptiv am häufigsten bemerkt: Der Lenkeingriff sogar in allen Fällen.

Bei der simulierten Falschauslösung erweisen sich alle drei Ausweichautomatiken als potenziell problematisch. Am schlechtesten schneidet Ausweichautomatik A ab, bei der deskriptiv der größte Querversatz hergestellt und in zwei Fällen sogar die Fahrstreifengrenze überfahren wurde, davon mindestens in einem Fall auf höchst gefährliche Weise. Insgesamt zeigt der durchschnittlich hergestellte Querversatz, dass die Fahrer den unberechtigten Systemeingriff deutlich abschwächen. Starke Bremsungen, die nachfolgenden Verkehr entscheidend gefährden könnten, traten selten auf, und auch die subjektiv empfundene Beeinträchtigung der Fahraufgabe durch den unberechtigten Systemeingriff gibt mit nur wenigen „gefährlich“- und keinem „unkontrollierbar“-Urteil keinen Anhaltspunkt für mangelnde Kontrollierbarkeit. Vor dem Hintergrund, dass die Probanden einerseits erst kurz zuvor einen berechtigten Systemeingriff erlebt und andererseits keinen zwingenden Grund (wie zum Beispiel herannahenden Gegenverkehr) hatten, die Lenkbewegung des Fahrzeugs zu unterbinden, ist die Kontrollierbarkeit der Systeme im Ernstfall womöglich sogar höher anzusetzen, als der hier beobachtete Querversatz vermuten lässt. Die empfundene Akzeptanz für die Systemeingriffe – nach der berechtigten Systemauslösung für alle Systeme als hoch bewertet – war nach der Falschauslösung allerdings stark vermindert und wurde nur für Ausweichautomatik B noch mehrheitlich als positiv angegeben.

Besondere Aufmerksamkeit verdient der Einfluss des Warntons. Zwar zeigen sich die Unterschiede zwischen den Ausweichautomatiken A und B (die sich nur durch An- oder Abwesenheit des Warntons unterscheiden) als statistisch nicht signifikant. Doch die deskriptiv deutliche Tendenz der erhöhten Wirksamkeit im Nutzenfall bei gleichzeitig deskriptiv besserer Kontrollierbarkeit im Fehlerfall deutet

darauf hin, dass der Warnton einen Ausweg aus dem Wirksamkeit-versus-Kontrollierbarkeit-Dilemma bietet. Zwar wurde der Signalton von manchen Probanden als „(eher) verwirrend“, mehrheitlich aber als „(eher) gut verständlich“ und auch bezüglich Hörbarkeit, Eignung, Unterstützung und Effektivität positiv bewertet. Der Warnton wurde von der Mehrheit der Probanden bewusst wahrgenommen, deskriptiv häufiger als die Anzeigen und Lenkeingriffe in den meisten Fällen. Dabei erwies sich der Warnton als einzige Komponente, die von den Probanden mehrheitlich vor dem Bemerkens des Hindernisses bewusst wahrgenommen wurde und weist damit auf eine besondere Eignung als Warnsignal für abgelenkte Fahrer hin.

9. Experiment 4 – Weitere Einflüsse

9.1. Hintergrund

In der Literatur findet sich eine Vielzahl von Experimenten, die sich dem Kollisionsvermeidungsverhalten von Fahrzeugführern widmet. Dabei wurden, wie bereits in Kapitel 2.4.3 berichtet, zum Teil sehr unterschiedliche Häufigkeiten beobachtet, mit der Fahrer den Versuch einleiten, ein Hindernis durch Lenken zu umfahren. Dabei wurde selten abschließend untersucht, welche Faktoren die Wahrscheinlichkeiten dafür auf welche Weise und in welchem Maße beeinflussen. Ähnlich verhält es sich mit Brems- und Lenkreaktionszeiten. McGehee, Mazzae und Baldwin (2000) beispielsweise geben mittlere Reaktionszeiten von weit über 1,5 s für eine Lenkreaktion und weit über 2,0 s für eine Bremsreaktion an. Andere Modelle (z.B. Kölner Modell: Burckhardt, 1985) und Studien (siehe z.B. Triggs & Harris, 1982, für eine Übersicht von Studien u.a. der US-amerikanischen National Highway Safety Administration) lassen weitaus kürzere Reaktionszeiten erwarten. Auch hier stellt sich die Frage, welche Parameter des jeweiligen Kollisionsszenarios die Zeit bis zur Fahrerreaktion auf welche Weise moderieren. Dazu kommt, dass bisherige Studien häufig Kollisionsszenarien mit größeren Zeitreserven verwendeten. Zu Hindernissen, die – wie in Experimenten 2 und 3 – erst in einem zeitlichen Abstand von nur 1,25 s für den Fahrer sichtbar werden, gibt es kaum Erkenntnisse, da die TTC meist in der Größenordnung von 1,5 s und höher gewählt ist. Zudem handelte es sich bei den in anderen Studien zum Einsatz kommenden Hindernissen in der Regel um solche mit größerer Eindringtiefe in den Fahrstreifen des Ego-Fahrzeugs, als dies in den hier berichteten Experimenten 2 und 3 der Fall war.

Um bereits existierende Erkenntnisse zu den Einflüssen auf das Fahrererleben und -verhalten um neue Erkenntnisse zu ergänzen, die sich auf geringe TTC und Hindernisse mit geringer Überlappung beziehen, sollte eine Studie durchgeführt werden, bei der das Fahrererleben und -verhalten bei einem plötzlich von der Seite kommenden Hindernis untersucht wird. Der Fokus lag dabei auf dem Einfluss des zeitlichen Abstands zum Hindernis, in dem es für den Fahrer erstmalig sichtbar wird, sowie auf dem Einfluss der Bewegungsgeschwindigkeit des Hindernisses. Besondere Aufmerksamkeit sollte dabei auf dem Fahrererleben liegen, das nur in wenigen veröffentlichten Studien erfasst oder berichtet wurde. Hierzu sollte der Fragebogen zur Bewertung von Fahr- und Verkehrssituationen (Neukum et al., 2008) verwendet und die darin gemachten Urteile zusätzlich mit anderen Subjektiveindrücken in Beziehung gesetzt werden.

9.2. Stichprobe

An der Studie nahmen 64 Versuchspersonen teil. Die Stichprobe setzte sich aus 56 Männern und 8 Frauen zusammen, die jeweils über eine gültige Fahrerlaubnis der Klasse B verfügten und sich in fahrtüchtigem Zustand befanden. Die Versuchspersonen waren zwischen 19 und 62 Jahre alt ($M = 28.1$, $SD = 9.6$), verfügten über eine Fahrleistung von durchschnittlich 18.396 km ($SD = 13174$) in den vergangenen zwölf Monaten und über eine bisherige Gesamtfahrleistung von durchschnittlich 151.914 km ($SD = 163137$). Keiner der Probanden hatte bereits im Vorfeld Erfahrungen mit CAPLOS.

9.3. Methodik

9.3.1. Messaufbau

Im Experiment „weitere Einflüsse“ wurde Versuchsträger 1 (Audi A6 Avant) genutzt. Die Anforderung von CAPLOS und die Aufzeichnung der objektiven Messdaten erfolgten mittels ADTF 2.9. Lenkradwinkel, ABS- und ESP-Eingriffe wurden mit einer Frequenz von 50 Hz, Fahrzeugposition, -beschleunigungen und -drehraten mit einer Frequenz von 100 Hz, Videos von Fahrerportrait, Fahrerfußraum und Fahrscene vor dem Fahrzeug mit einer Frequenz von 25 Bildrate aufgezeichnet. Die Messdatenaufzeichnung wurde in einem Ringspeicher gepuffert und erstreckte sich jeweils über die 5 s vor und die 10 s nach jeder Systemauslösung. Zur Darstellung des Hindernisses wurde CAPLOS verwendet.

9.3.2. Versuchsstrecke und -material

Die Studie fand auf dem für den öffentlichen Verkehr gesperrten Testgelände der Universität der Bundeswehr München statt. Die Versuchsszenarien waren auf einem geraden Abschnitt einer Fahrbahn mit je einem Fahrstreifen von 3,1 m Breite pro Fahrtrichtung angesiedelt. An einer Stelle befand sich am rechten Fahrbahnrand CAPLOS, getarnt durch einen mit Planen verhangenen Aufbau aus handelsüblichen Bauzäunen. CAPLOS wurde so eingerichtet, dass die Hindernisattrappe im ausgefahrenen Zustand mit ihrem äußersten Punkt etwa 0,6 m in den Fahrstreifen des Ego-Fahrzeugs eindringt.

9.3.3. Versuchsablauf

Die Probanden machten zunächst einige demographische Angaben sowie Angaben zu ihrer Fahrerfahrung und ihren Fahrgewohnheiten (Anhang M: Fragebogen 4.1). Im Anschluss wurden sie gebeten, Fahrersitz, Seiten- und Innenspiegel, sowie Lenkrad passend einzustellen. Danach fand eine Fahrzeuggewöhnung statt, bei der Probanden sanftes und kräftiges Beschleunigen, sanftes und kräftiges Abbremsen, das Halten verschiedener Geschwindigkeiten, das Durchfahren einer Engstelle, sowie das Lenken beim Durchfahren eines Slalom-Parcours übten, bis sie nach eigenem und nach dem Empfinden des Versuchsleiters mit dem Verhalten und den Abmessungen des Fahrzeugs ausreichend vertraut waren.

Um den wahren Versuchsinhalt zunächst nicht preiszugeben, wurden die Probanden mit der Legende konfrontiert, es würde natürliches menschliches Fahrverhalten aufgezeichnet, um auf Basis dieser Messdaten autonome Fahrfunktionen auslegen zu können. Die Probanden wurden instruiert, entlang der Versuchsstrecke zu fahren und sich wie im alltäglichen Straßenverkehr zu verhalten, dabei jedoch eine Geschwindigkeit von 50 kmh^{-1} Stunde einzuhalten. Auf einem geraden Abschnitt der Strecke wurden sie mit einem plötzlichen Hindernis konfrontiert, indem CAPLOS (s. Kapitel 5.2) kurz vor dem Ego-Fahrzeug eine Fahrzeugattrappe seitlich in die Fahrbahn schob. Dabei wurde CAPLOS entweder früh oder spät ausgelöst und die Fahrzeugattrappe entweder langsam oder schnell bewegt (s. Abbildung 66).

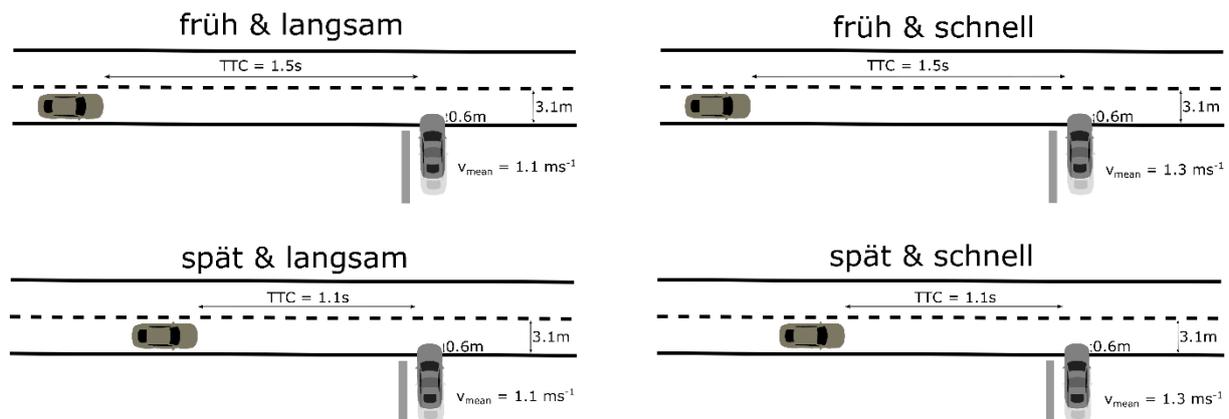


Abbildung 66: Versuchsanordnung (Experiment 4)

Im Anschluss an die Bewältigung der Situation wurden die Probanden gebeten, sowohl den Fragebogen zur Bewertung von Fahr- und Verkehrssituationen, als auch einen Fragebogen zum Erleben der Situation (Anhang N: Fragebogen 4.2) auszufüllen. Diese Fragebögen wurden entweder in der eben berichteten, oder in der umgekehrten Reihenfolge bearbeitet.

9.3.4. Versuchsdesign

Die Studie verwendete ein vollständiges 2 (Hindernis-Anforderung: früh vs. spät) x 2 (Hindernis-Geschwindigkeit: langsam vs. schnell) x 2 (Fragebogen-Reihenfolge: SBFV zuerst vs. SBFV als zweites) Intersubjekt-Design. Der zeitliche Abstand des Ego-Fahrzeugs zur Position des Hindernisses betrug in der Versuchsbedingung mit früher Anforderung 1,8 s, in der Versuchsbedingung mit später Anforderung 1,4 s. In Kombination mit der zeitlichen Latenz von etwa 300 ms bis 350 ms bis zur ersten Sichtbarkeit der Fahrzeugattrappe ergaben sich somit TTCs von etwa 1,1 s respektive 1,5 s. Die Hindernisgeschwindigkeit wurde über den Betriebsdruck am pneumatischen Antrieb von CAPLOS geregelt. Der Betriebsdruck betrug in der Versuchsbedingung mit langsamer Hindernisbewegung 5 bar und in der Versuchsbedingung mit schneller Hindernisbewegung 8 bar. Dies resultierte in einer mittleren Bewegungsgeschwindigkeit der Fahrzeugattrappe von $1,1 \text{ ms}^{-1}$ respektive $1,3 \text{ ms}^{-1}$. Die in Experiment 4 verwendeten UV sind in Tabelle 43, die verwendeten AV in Tabelle 44 aufgeführt.

Tabelle 43: Unabhängige Variablen (UV) in Experiment 4

UV	Ausprägungen	Erhebungsart
<i>Hindernis-Anforderung</i>	<ul style="list-style-type: none"> • früh • spät 	Intersubjekt
<i>Hindernis-Bewegung</i>	<ul style="list-style-type: none"> • langsam • schnell 	Intersubjekt

Tabelle 44: Abhängige Variablen (AV) in Experiment 4

AV	[AV]	Operationalisierung
<i>Kritikalität nach SBFV</i>	-	Probandenurteil auf der SBFV
<i>Empfundene Überraschung</i>	-	Anhang N: Fragebogen 4.2
<i>Empfundenes Erschrecken</i>	-	Anhang N: Fragebogen 4.2
<i>Empfundene Angst</i>	-	Anhang N: Fragebogen 4.2
<i>Empfundene Handlungsbereitschaft</i>	-	Anhang N: Fragebogen 4.2
<i>Empfundene notwendige Reaktionsstärke</i>	-	Anhang N: Fragebogen 4.2
<i>Empfundene Kritikalität</i>	-	Anhang N: Fragebogen 4.2
<i>Empfundene Unfallwahrscheinlichkeit</i>	-	Anhang N: Fragebogen 4.2
<i>Auftreten Primärkollision</i>	-	Zusammenstoß von Ego-Fahrzeug und Hindernis
<i>Auftreten Bremsreaktion</i>	-	Betätigung des Bremspedals vor Passieren des Hindernisses
<i>Auftreten Lenkreaktion</i>	-	Lenkradwinkel nach links von mindestens 5° vor Passieren des Hindernisses
<i>Reaktionszeit</i>	1 s	Zeit von Anforderung CAPLOS bis zum Beginn einer Brems- oder Lenkreaktion
<i>Bremsreaktionszeit</i>	1 s	Zeit von Anforderung CAPLOS bis zum Beginn einer Bremsreaktion
<i>Lenkreaktionszeit</i>	1 s	Zeit von Anforderung CAPLOS bis zum Beginn einer Lenkreaktion
<i>Stärke Bremsreaktion</i>	1 ms ⁻²	Minimale Längsbeschleunigung während des Ausweichmanövers
<i>Stärke Lenkreaktion</i>	1°	Maximaler Lenkradwinkel nach links während des Ausweichmanövers
<i>Lateraler Sicherheitsabstand</i>	1 m	Seitlicher Abstand der vorderen rechten Fahrzeugecke zum äußersten Punkt des Hindernisses beim Passieren

Auf Unterschiede zwischen den Versuchsbedingungen bezüglich der Kritikalität nach SBFV, der empfundenen Überraschung, des empfundenen Erschreckens, der empfundenen Angst, der empfundenen Handlungsbereitschaft, der empfundenen notwendigen Reaktionsstärke, der empfundenen Kritikalität

und der empfundenen Unfallwahrscheinlichkeit wurde mithilfe des Mann-Whitney-U-Tests (für Haupteffekte) und des Kruskal-Wallis-Tests (für Interaktionseffekte) geprüft. Auf Unterschiede zwischen den Versuchsbedingungen bezüglich der Häufigkeit von Primärkollisionen, Lenk- und Bremsreaktionen, sowie Einhalten eines lateralen Sicherheitsabstandes wurde mithilfe des Pearson- χ^2 -Tests geprüft. Auf Unterschiede zwischen den Versuchsbedingungen bezüglich der Reaktionszeiten sowie der Stärke der Lenk- und Bremsreaktionen wurde jeweils mithilfe einer einfaktoriellen ANOVA zweiseitig geprüft. Alle Hypothesentests legten ein Signifikanzniveau von $\alpha = 5\%$ zu Grunde. Korrelationen zwischen den AV wurden mithilfe des Pearson-Korrelationskoeffizienten berechnet.

9.4. Ergebnisse

Die Datensätze zweier Probanden (beide aus Versuchsgruppen mit kleinem Hindernis-Abstand), die kein Hindernis bemerkt hatten und sich deshalb auch keiner kritischen Fahrsituation oder der Notwendigkeit einer Handlung gewahr waren, wurden in der Analyse im Folgenden nicht berücksichtigt.

9.4.1. Subjektive Messdaten

Es wurde kein statistisch signifikanter Einfluss (weder als Haupt-, noch als Interaktionseffekt mit anderen UV) der Reihenfolge in denen die Fragebögen bearbeitet wurden beobachtet. Im Folgenden werden deshalb nur die Faktoren Hindernis-Abstand (TTC bei CAPLOS-Anforderung) und Hindernis-Geschwindigkeit (Betriebsdruck von CAPLOS) betrachtet.

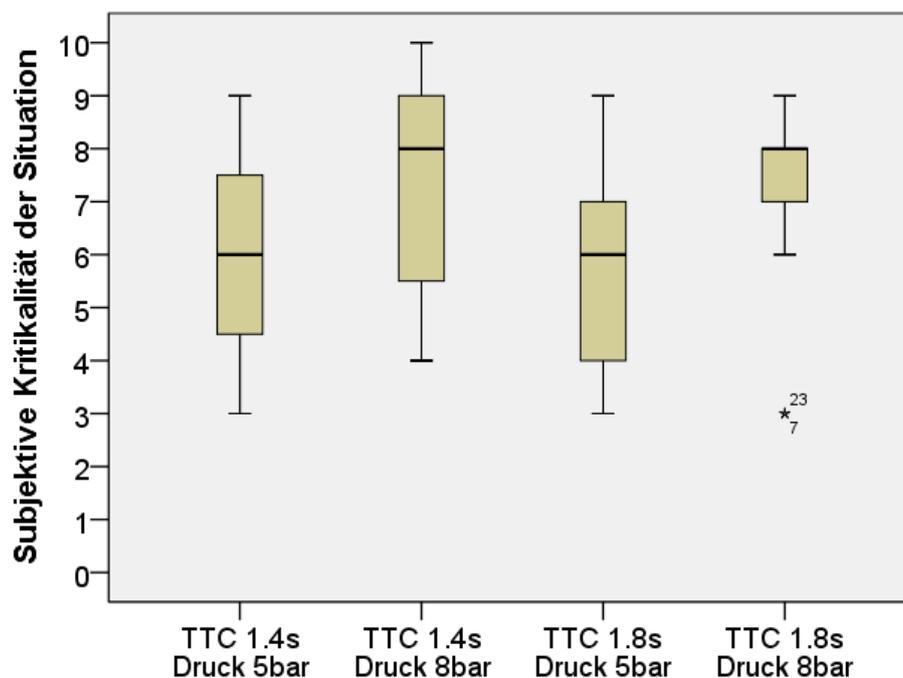


Abbildung 67: SBFV-Urteile der Probanden bei spätem (TTC 1,4 s) und frühem (1,8 s), sowie bei langsamem (Druck 5 bar) und schnellem (Druck 8 bar) Hindernis

Die Ergebnisse der Beurteilung des erlebten Fahr Szenarios auf der SBFV sind nach den vier Versuchsbedingungen aufgeschlüsselt in Abbildung 67 dargestellt. Im Median beurteilten die Probanden die erlebte Situation als sehr unangenehm (6) bei langsamer Hindernis-Bewegung und als gefährlich (8) bei schneller Hindernis-Bewegung. Der Effekt der Hindernis-Geschwindigkeit ist statistisch signifikant, $U = 2.73$, $p = .006$.

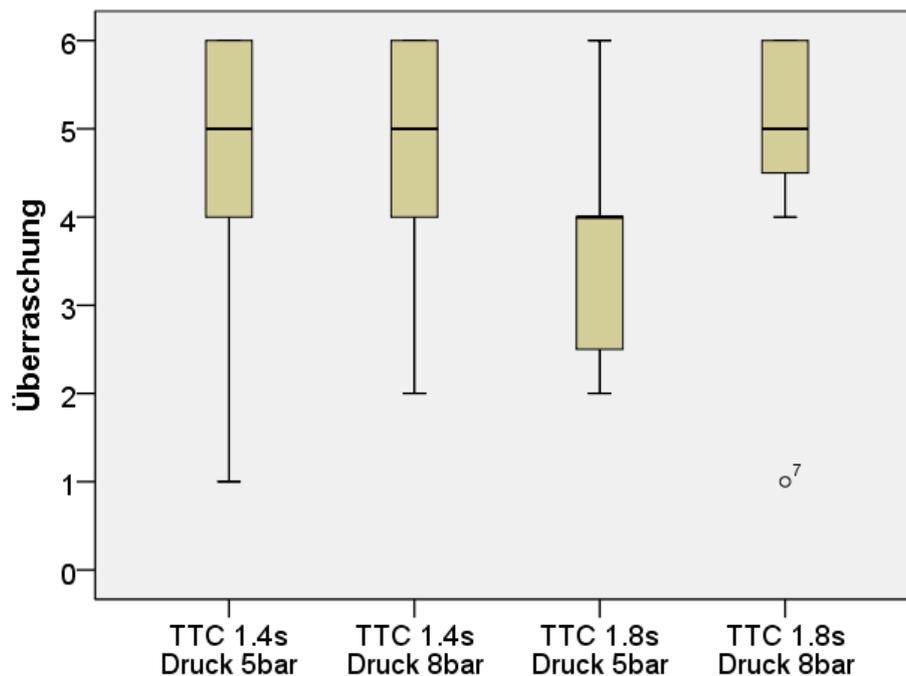


Abbildung 68: Ausmaß der empfundenen Überraschung bei spätem (TTC 1,4 s) und frühem (1,8 s), sowie bei langsamem (Druck 5 bar) und schnellem (Druck 8 bar) Hindernis

Die Probandenurteile zum Ausmaß der erlebten Überraschung sind nach den vier Versuchsbedingungen aufgeschlüsselt in Abbildung 68 dargestellt. Im Median beurteilten die Probanden das Ausmaß der erlebten Überraschung als „hoch“ (5), lediglich in der Gruppe mit langsamer Hindernis-Bewegung und großem Hindernis-Abstand nur als „eher hoch“ (4). Der Haupteffekt der Hindernis-Geschwindigkeit, $U = 2.30$, $p = .02$, sowie der Interaktionseffekt von Hindernis-Geschwindigkeit und Hindernis-Abstand, $H(3) = 10.164$, $p = .02$, auf das Ausmaß der erlebten Überraschung erwiesen sich als statistisch signifikant.

Die Probandenurteile zum Ausmaß des erlebten Erschreckens sind nach den vier Versuchsbedingungen aufgeschlüsselt in Abbildung 69 dargestellt. Im Median gaben die Probanden an, „eher stark“ (4) erschrocken zu sein, lediglich in der Gruppe mit langsamer Hindernis-Bewegung und großem Hindernis-Abstand gaben Probanden an, nur „mittelmäßig“ (3) bis „eher schwach“ (2) erschrocken zu sein. Der Haupteffekt der Hindernis-Geschwindigkeit, $U = 2.78$, $p = .005$, sowie der Interaktionseffekt von Hindernis-Geschwindigkeit und Hindernis-Abstand, $H(3) = 9.27$, $p = 0.03$, auf das Ausmaß des erlebten Erschreckens erwiesen sich als statistisch signifikant.

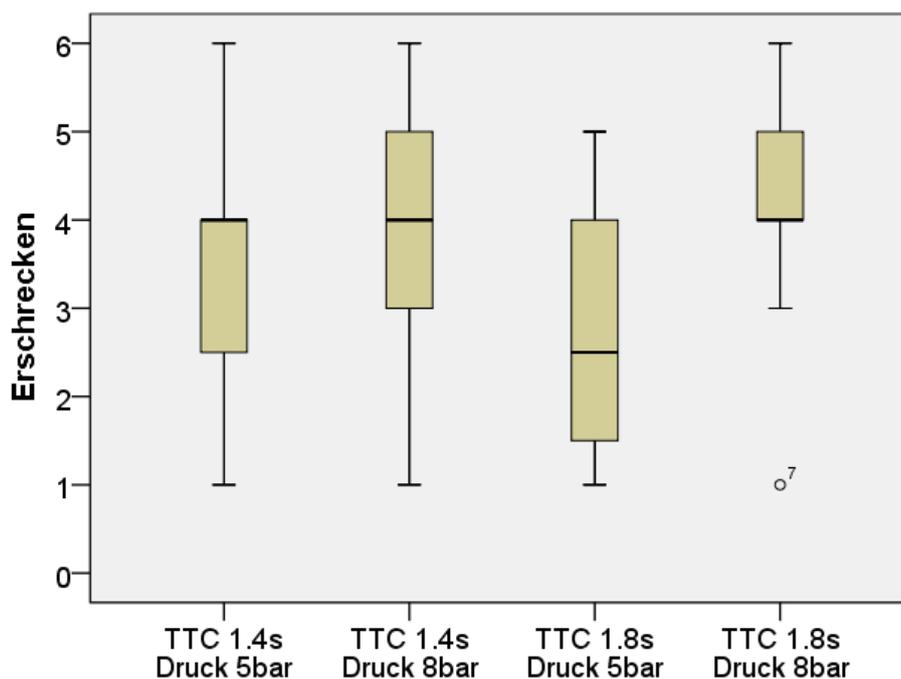


Abbildung 69: Ausmaß des empfundenen Erschreckens bei spätem (TTC 1,4 s) und frühem (1,8 s), sowie bei langsamem (Druck 5 bar) und schnellem (Druck 8 bar) Hindernis

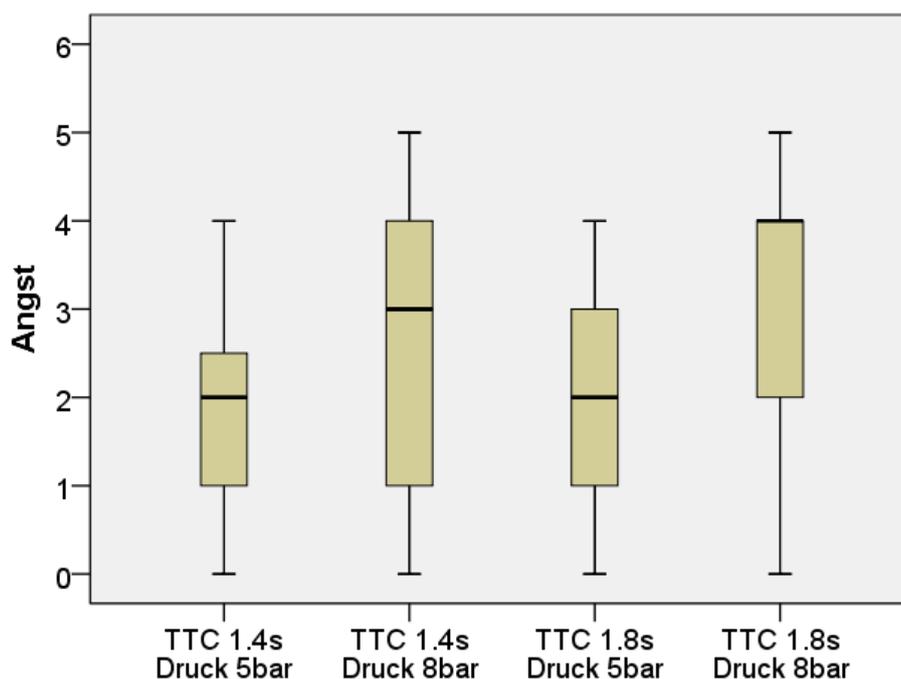


Abbildung 70: Ausmaß der empfundenen Angst bei spätem (TTC 1,4 s) und frühem (1,8 s), sowie bei langsamem (Druck 5 bar) und schnellem (Druck 8 bar) Hindernis

Die Probandenurteile zum Ausmaß der erlebten Angst sind nach den vier Versuchsbedingungen aufgeschlüsselt in Abbildung 70 dargestellt. Im Median gaben die Probanden die erlebte Angst bei langsamer Hindernis-Bewegung als „eher schwach“ (2) an, bei schneller Hindernis-Bewegung als „mittelmäßig“ (3) bei kleinem und als „eher stark“ (4) bei großem Hindernis-Abstand. Der Haupteffekt der

Hindernis-Geschwindigkeit, $U = 2.75$, $p = .006$, sowie der Interaktionseffekt von Hindernis-Geschwindigkeit und Hindernis-Abstand, $H(3) = 9.55$, $p = .02$, auf das Ausmaß der erlebten Angst erwiesen sich als statistisch signifikant.

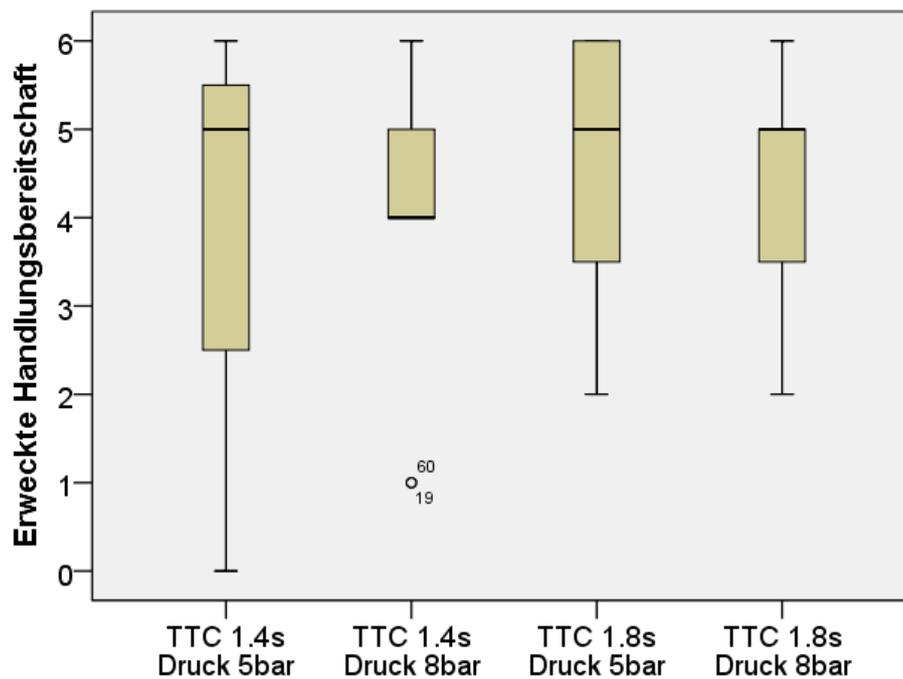


Abbildung 71: Ausmaß der empfundenen erweckten Handlungsbereitschaft bei spätem (TTC 1,4 s) und frühem (1,8 s), sowie bei langsamem (Druck 5 bar) und schnellem (Druck 8 bar) Hindernis

Die Probandenurteile zur Stärke der erweckten Handlungsbereitschaft sind nach den vier Versuchsbedingungen aufgeschlüsselt in Abbildung 71 dargestellt. Im Median gaben die Probanden die erweckte Handlungsbereitschaft als „stark“ (5) an, lediglich in der Gruppe mit schneller Hindernis-Bewegung und kleinem Hindernis-Abstand als nur „eher stark“ (4). Die Unterschiede sind statistisch nicht signifikant.

Die Probandenurteile zum Ausmaß der notwendigen Reaktionsstärke sind nach den vier Versuchsbedingungen aufgeschlüsselt in Abbildung 72 dargestellt. Im Median gaben die Probanden die Stärke der zur Verhinderung eines Unfalls notwendigen Reaktion bei langsamer Hindernis-Bewegung als „eher stark“ (4) an, bei schneller Hindernis-Bewegung als „stark“ (5) bei kleinem und als „eher stark“ (4) bis „stark“ (5) bei großem Hindernis-Abstand. Die Unterschiede sind statistisch nicht signifikant.

Die Probandenurteile zur empfundenen Sicherheitskritikalität der erlebten Fahrsituation sind nach den vier Versuchsbedingungen aufgeschlüsselt in Abbildung 73 dargestellt. Im Median beurteilten die Probanden die Situation als „sicherheitskritisch“ (5), lediglich in der Gruppe mit schneller Hindernis-Bewegung und kleinem Hindernis-Abstand sogar als „sehr sicherheitskritisch“ (6). Die Unterschiede sind statistisch nicht signifikant.

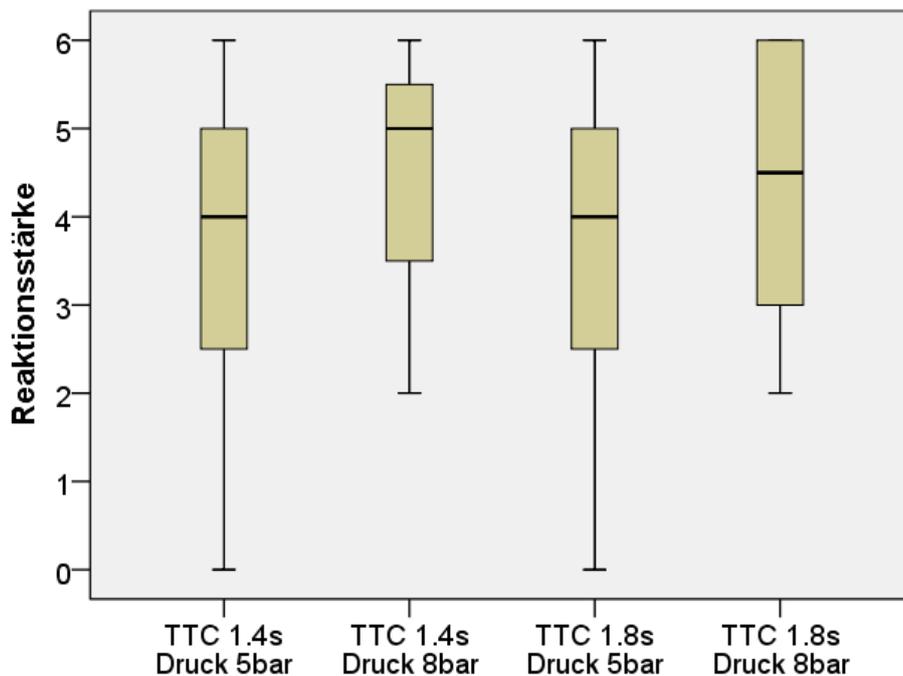


Abbildung 72: Ausmaß der empfundenen notwendigen Reaktionsstärke bei spätem (TTC 1,4 s) und frühem (1,8 s), sowie bei langsamem (Druck 5 bar) und schnellem (Druck 8 bar) Hindernis

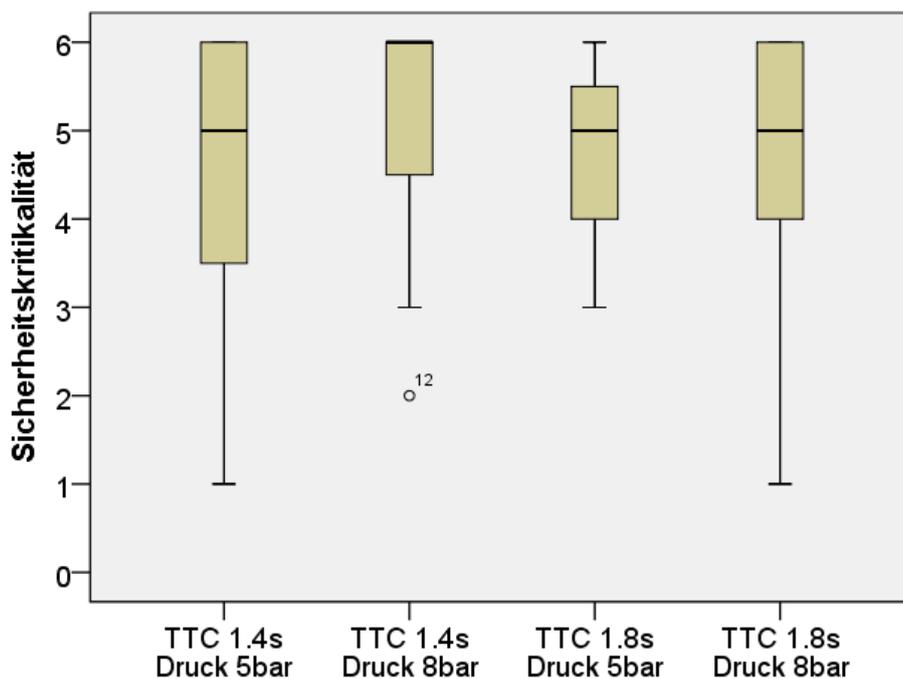


Abbildung 73: Ausmaß der empfundenen Sicherheitskritikalität bei spätem (TTC 1,4 s) und frühem (1,8 s), sowie bei langsamem (Druck 5 bar) und schnellem (Druck 8 bar) Hindernis

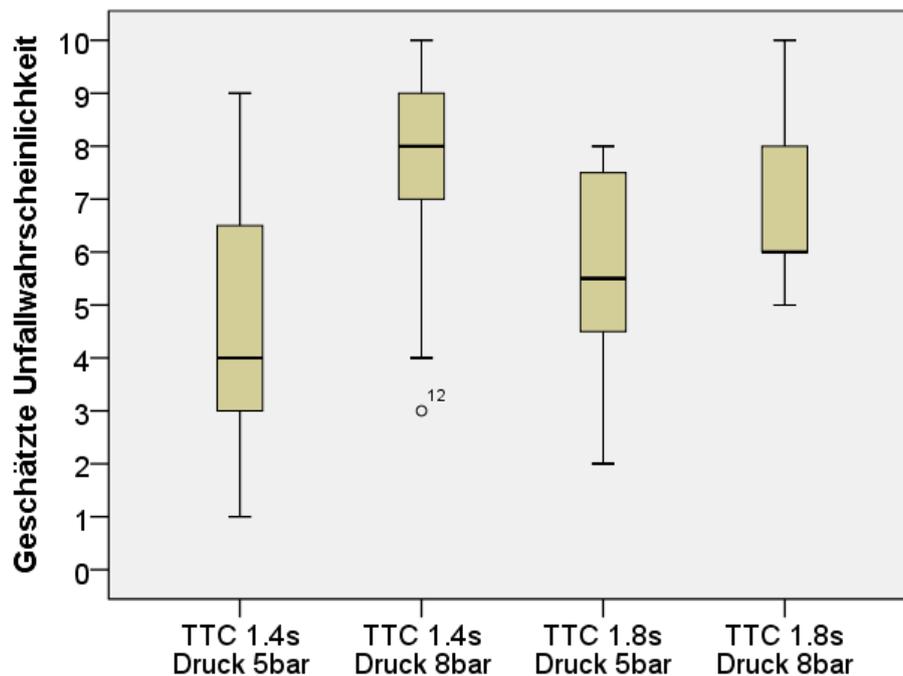


Abbildung 74: Geschätzte Unfallwahrscheinlichkeit bei spätem (TTC 1,4 s) und frühem (1,8 s), sowie bei langsamem (Druck 5 bar) und schnellem (Druck 8 bar) Hindernis

Die Probandenurteile zur Kollisionswahrscheinlichkeit durchschnittlicher Fahrer in der erlebten Fahr-situation sind nach den vier Versuchsbedingungen aufgeschlüsselt in Abbildung 74 dargestellt. Im Median schätzten die Probanden die Unfallwahrscheinlichkeit auf 40 % (4) bei langsamer Hindernis-Bewegung und kleinem Hindernis-Abstand, auf 80 % (8) bei schneller Hindernis-Bewegung und klei-nem Hindernis-Abstand, auf 50 % (5) bis 60 % (6) bei langsamer Hindernis-Bewegung und großem Hindernis-Abstand und auf 60 % (6) bei schneller Hindernis-Bewegung und großem Hindernis-Ab-stand. Der Haupteffekt der Hindernis-Geschwindigkeit, $U = 3.41, p = .001$, sowie der Interaktionseffekt von Hindernis-Geschwindigkeit und Hindernis-Abstand, $H(3) = 14.69, p = .002$, auf die geschätzte Kol-lisionswahrscheinlichkeit für durchschnittliche Fahrer erwiesen sich als statistisch signifikant.

9.4.2. Objektive Messdaten

Tabelle 45: Absolute Häufigkeit von Bremsreaktionen

	spät & lang-sam	spät & schnell	früh & lang-sam	früh & schnell
Kein Bremsbeginn vor Hindernis	7	5	5	2
Bremsbeginn vor Hindernis	8	10	11	14

Tabelle 45 gibt, aufgeschlüsselt nach den vier Versuchsbedingungen, an, wie viele Probanden vor Er-reichen des Hindernisses eine Bremsreaktion zeigten. Die Unterschiede sind statistisch nicht signifi-kant, $\chi^2(3, N=62) = 3.72, p = 0.29$.

Tabelle 46 gibt, aufgeschlüsselt nach den vier Versuchsbedingungen, an, wie viele Probanden vor Erreichen des Hindernisses eine Lenkreaktion nach links zeigten. Die Unterschiede sind statistisch nicht signifikant, $\chi^2(3, N=62) = 6.70, p = .08$.

Tabelle 46: Absolute Häufigkeit von Lenkreaktionen

	spät & lang- sam	spät & schnell	früh & lang- sam	früh & schnell
<i>Kein Lenkbeginn vor Hindernis</i>	3	0	1	1
<i>Lenkbeginn vor Hindernis</i>	12	15	15	15

Tabelle 47 gibt, aufgeschlüsselt nach den vier Versuchsbedingungen, an, welche Reaktionsabfolge von wie vielen Probanden gewählt wurde. Nur zwei Fahrer, beide in der Gruppe mit langsamer Hindernis-Bewegung und kleinem Hindernis-Abstand, zeigten keinerlei Reaktion vor Erreichen des Hindernisses. Nur drei der Fahrer, die vor dem Hindernis reagierten, zeigten ausschließlich eine Bremsreaktion. Die am häufigsten beobachteten Reaktionsmuster waren eine kombinierte Lenk- und Bremsreaktion mit einer schnelleren Lenkreaktion, oder eine Lenkreaktion ohne zusätzliches Betätigen der Bremse. Die Unterschiede waren statistisch nicht signifikant, $\chi^2(15, N=62) = 16.75, p = .33$.

Tabelle 47: Absolute Häufigkeit aller Reaktionsmuster

	spät & lang- sam	spät & schnell	früh & lang- sam	früh & schnell
<i>Keine Reaktion</i>	2	0	0	0
<i>Nur Bremsreaktion</i>	1	0	1	1
<i>Nur Lenkreaktion</i>	5	5	5	3
<i>Erst Brems-, dann Lenkreaktion</i>	1	4	3	3
<i>Erst Lenk-, dann Bremsreaktion</i>	6	6	5	9
<i>simultane Brems-&Lenkreaktion</i>	0	0	2	0

Die in den vier Versuchsbedingungen beobachteten mittleren Reaktionszeiten (relativ zur Anforderung des Hindernisses) sind in Abbildung 75 dargestellt. Es wurden keine statistisch signifikanten Effekte des Hindernis-Abstands, $F(1, 58) = 1.16, p = .29$, oder der Hindernis-Geschwindigkeit, $F(1, 58) = 0.12, p = .73$, beobachtet.

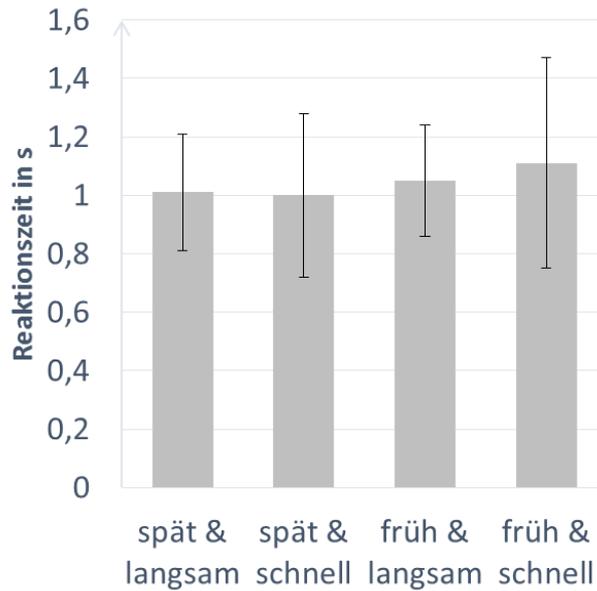


Abbildung 75: Reaktionszeiten von Hindernisanforderung bis zu erster Brems- oder Lenkreaktion. Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung

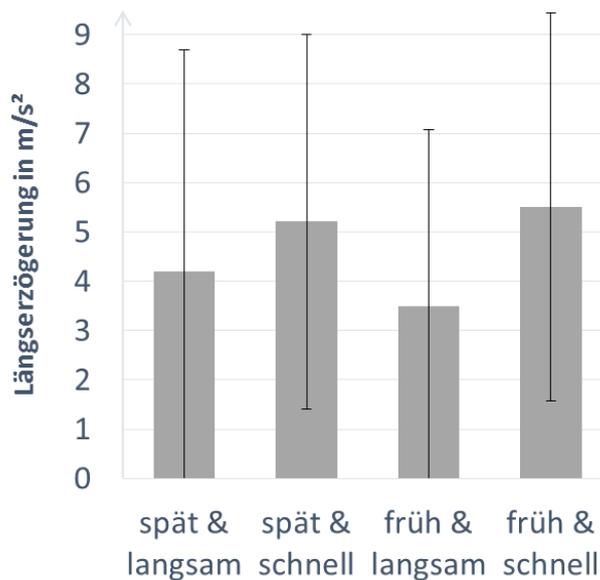


Abbildung 76: Maximale Längsverzögerung. Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung

Die in den vier Versuchsbedingungen beobachteten maximalen Längsverzögerungen sind in Abbildung 76 dargestellt. Deskriptiv ist die maximale Längsverzögerung größer in der Bedingung mit schneller Hindernis-Bewegung ($M = 5.36 \text{ ms}^{-2}$, $SD = 3.81 \text{ ms}^{-2}$) als in der Bedingung mit langsamer Hindernis-Bewegung ($M = 3.84 \text{ ms}^{-2}$, $SD = 4.00 \text{ ms}^{-2}$). Es wurden keine statistisch signifikanten Effekte des Hindernis-Abstands, $F(1, 58) = 0.04$, $p = .85$, oder der Hindernis-Geschwindigkeit, $F(1, 58) = 2.28$, $p = 0.14$, beobachtet.

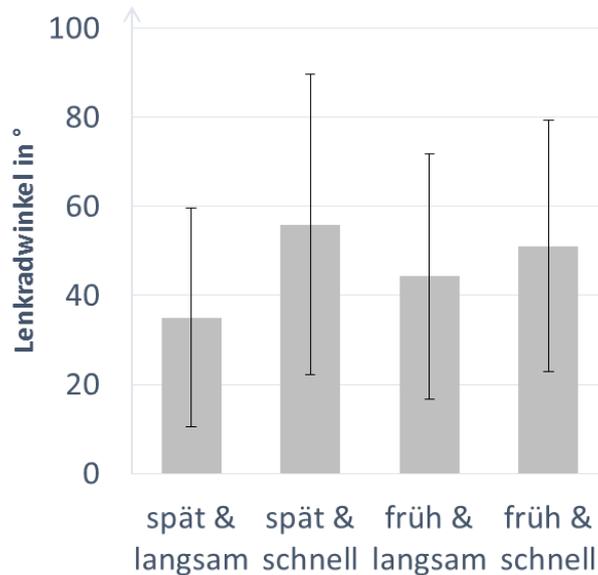


Abbildung 77: Maximaler Lenkradwinkel. Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung

Die in den vier Versuchsbedingungen beobachteten maximalen Lenkradwinkel sind in Abbildung 77 dargestellt. Deskriptiv ist der maximale Lenkradwinkel größer in der Bedingung mit schneller Hindernis-Bewegung ($M = 53.4^\circ$, $SD = 30.6^\circ$) als in der Bedingung mit langsamer Hindernis-Bewegung ($M = 39.7^\circ$, $SD = 26.1^\circ$). Es wurden keine statistisch signifikanten Effekte des Hindernis-Abstands, $F(1, 58) = 0.09$, $p = .76$, oder der Hindernis-Geschwindigkeit, $F(1, 58) = 3.59$, $p = .06$, beobachtet.

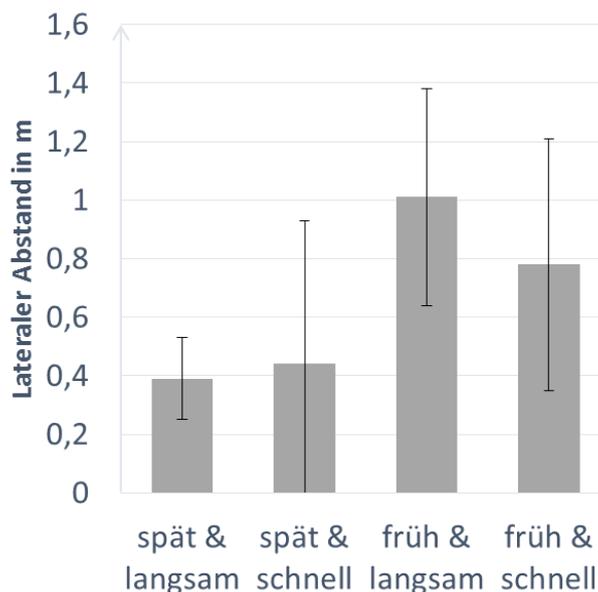


Abbildung 78: Seitlicher Abstand zum Hindernis beim Passieren. Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung

Der in den vier Versuchsbedingungen beobachtete seitliche Sicherheitsabstand beim Passieren des Hindernisses ist in Abbildung 78 dargestellt. Dabei ist der Einfluss des Hindernis-Abstands auf den lateralen Abstand, in dem das Hindernis passiert wird, statistisch signifikant, $F(1,56) = 27.20$, $p < .001$,

$\eta_p^2 = .33$: Der seitliche Abstand war größer in der Bedingung mit früh erscheinendem Hindernis ($M = 0.89$ m, $SD = 0.41$ m) als in der Bedingung mit spät erscheinendem Hindernis ($M = 0.42$ m, $SD = 0.29$ m). Der Einfluss der Hindernis-Geschwindigkeit ist statistisch nicht signifikant, $F(1, 56) = 1.01, p = .32$.

Die Interkorrelation zwischen den erhobenen Subjektivvariablen war in zahlreichen Fällen statistisch signifikant. Das Probandenurteil auf der SBFV korrelierte zum Beispiel signifikant positiv mit

- dem angegebenen Ausmaß an Überraschung, $r(55) = .69, p < .001$,
- dem angegebenen Ausmaß des Erschreckens, $r(55) = .53, p < .001$,
- dem angegebenen Ausmaß der Angst, $r(55) = .57, p < .001$,
- dem angegebenen Ausmaß notwendiger Reaktionsstärke, $r(55) = .34, p = .006$,
- der angegebenen Sicherheitskritikalität, $r(55) = .29, p = .02$,
- sowie der angegebenen Kollisionswahrscheinlichkeit für durchschnittliche Fahrer, $r(55) = .66, p < .001$,

und signifikant negativ mit

- dem angegebenen Ausmaß erweckter Handlungsbereitschaft, $r(55) = -.29, p = .02$.

Statistisch signifikante Korrelationen traten auch zwischen Subjektiv- und Objektivmaßen auf. Hierbei wurden beobachtet:

- Der Lateralabstand beim Passieren des Hindernisses korrelierte statistisch signifikant negativ mit dem SBFV-Urteil, $r(55) = -.33, p = .01$, sowie dem angegebenen Ausmaß an Überraschung, $r(55) = -.35, p = .006$, und positiv mit dem angegebenen Ausmaß der erweckten Handlungsbereitschaft, $r(55) = .38, p = .003$.
- Die maximale Längsverzögerung korrelierte statistisch signifikant positiv mit dem angegebenen Ausmaß notwendiger Reaktionsstärke, $r(55) = .47, p < .001$.
- Der maximale Lenkradwinkel korrelierte statistisch signifikant positiv mit dem angegebenen Ausmaß der erweckten Handlungsbereitschaft, $r(55) = .50, p < .001$.
- Die Reaktionszeit korrelierte signifikant positiv mit dem angegebenen Ausmaß der erlebten Angst, $r(55) = .32, p = .02$, und negativ mit dem angegebenen Ausmaß der erweckten Handlungsbereitschaft, $r(55) = -.34, p = .01$.

9.5. Diskussion

Das durchgeführte Experiment untersuchte den Einfluss der Bewegungsgeschwindigkeit des Hindernisses und des Abstands, in dem es für den Fahrer sichtbar wird, auf sein Erleben und Verhalten. Dabei wurden bestimmte Muster aufgedeckt.

Die Kollisionsvermeidung im engeren Sinne war im gegebenen Szenario sehr einfach oder, je nach lateraler Ausgangsposition des Ego-Fahrzeugs, in manchen Fällen sogar überflüssig. Dies gründet auf der geringen Überlappung zwischen Hindernis und Ego-Fahrzeug, das bei der Fahrt mittig im Fahrstreifen das Hindernis nur auf einer Breite von 1 cm gestreift hätte. Dem Fahrer war jedoch bis 1 s nach Anforderung des Hindernisses noch unklar, in welcher Position es zur Ruhe kommen würde. Darüber hinaus darf davon ausgegangen werden, dass sich Fahrer bei einem Sicherheitsabstand von nur wenigen Zentimetern (zumindest jenseits der Schrittgeschwindigkeit) nicht wohlfühlen. Es ist deshalb stark davon auszugehen, dass ein Fahrer, der die Möglichkeit dazu hat, auch versuchen wird, durch einen Eingriff in die Fahrzeugquer- und/oder -längsführung einen größeren Abstand herzustellen. Diese Erwartung wurde dadurch bestätigt, dass 60 von 64 Fahrern (wovon nur 62 das Hindernis überhaupt bemerkten) eine korrekt zur Entschärfung der Situation beitragende Reaktion zeigten. Das Szenario eignete sich also dazu, Kollisionsvermeidungsverhalten hervorzurufen.

Die Häufigkeit von Lenkreaktionen lag mit 57 von 62 Fahrern (etwa 92%), die das Hindernis überhaupt bemerkten, recht hoch. Dies ist wahrscheinlich auf eine Reihe von Effekten zurückzuführen:

- Einerseits gibt es Belege dafür, dass die Verfügbarkeit (und natürlich die Einsehbarkeit oder Ersichtlichkeit, die eine Voraussetzung für das Wissen um die Verfügbarkeit ist) von Manövrierraum für ein Ausweichmanöver positiv die Wahrscheinlichkeit beeinflusst, mit der ein Fahrer eine Lenkreaktion zeigt (z.B. auch Kapitel 7.5.1.2 und 8.2). Im gegebenen Szenario war die Fahrbahn (insbesondere der Gegenfahrstreifen) nicht anderweitig blockiert oder in ihrer Einsehbarkeit (zumindest bis etwa 50 m jenseits des Hindernisses) eingeschränkt. (Anmerkung: Die Verfügbarkeit von Manövrierraum ist natürlich teilweise konfundiert mit dem zum Ausweichen notwendigen Querversatz sowie dem Wissen über den genauen Bahnverlauf oder die finale Position des Hindernisses, s.u.)
- Weiterhin gibt es Belege dafür, dass die Wahrscheinlichkeit einer Lenkreaktion bei geringeren TTCs höher ist (z.B. Eckert et al., 2011; Lechner & Malaterre, 1991). Zwar konnte dieser Effekt für die beiden unterschiedlichen, im gegebenen Szenario verwendeten TTCs nicht repliziert werden, doch ist dies wahrscheinlich auf einen Sättigungseffekt zurückzuführen: im Vergleich zu früheren Studien ist bereits die größere hier verwendete TTC sehr niedrig und rief bereits bei nahezu allen Probanden eine Lenkreaktion hervor.

- Andererseits gibt es Belege dafür, dass der zum Ausweichen benötigte Querversatz die Wahrscheinlichkeit für eine Lenkreaktion negativ beeinflusst (Adams, 1994). Im gegebenen Szenario war der benötigte Querversatz zwar sehr gering. Der Beitrag dieses Umstands zur hohen Zahl der Lenkreaktionen muss allerdings in Frage gestellt oder zumindest ins Verhältnis gesetzt werden: Aufgrund des Aufbaus und der Funktionsweise von CAPLOS beschleunigte das Hindernis bis kurz vor dem vollständig ausgefahrenen Zustand, der frühestens 1 s nach Anforderung erreicht war. Davon ausgehend, dass es ab diesem Moment wenigstens 150 ms bis 200 ms dauert, ehe das abrupte Anhalten des Hindernisses bewusst verarbeitet wurde und auf die neue Information intentional reagiert werden kann, entfällt der Großteil der beobachteten Lenkreaktionen auf den Zeitraum, in dem diese Information noch nicht zur Verfügung stand.
- Es gibt auch Hinweise darauf, dass definitives Wissen über den Bahnverlauf oder die finale Position des Hindernisses die Wahrscheinlichkeit von Lenkreaktionen positiv beeinflusst: So können beispielsweise die relativ hohen Lenkhäufigkeiten bei Adams et al. (1995) erklärt werden, wo die Kollision mit einem stationären Hindernis vermieden werden musste. Zwar war das plötzliche Anhalten des Hindernisses im Falle von CAPLOS durch den starken Ruck und das durch ihn erzeugte Nicken der Fahrzeugattrappe sehr deutlich wahrnehmbar und gab die finale Position des Hindernisses sehr salient preis. Aber auch hier muss einschränkend angemerkt werden, dass diese Information erst zu einem Zeitpunkt zur Verfügung stand, zu dem der Großteil der Lenkreaktionen bereits erfolgt war.
- Es ist anzunehmen, dass die hohe Lenkhäufigkeit nicht zuletzt durch die schnelle laterale Bewegung des Hindernisses hervorgerufen wird. Dies ist nicht nur im Einklang mit der in Kapitel 2.4.3 bereits erwähnten Befunde, dass sich schneller bewegende Stimuli auch schneller verarbeitet werden und schnellere Reaktionen hervorrufen – und dadurch möglicherweise auch leichter reflexhafte Reaktionen hervorrufen. Es ist zudem bekannt, dass Reaktionen, die mit dem Reiz kompatibel sind, schneller und mit weniger Fehlern erfolgen, als inkompatible (Überblick bei Proctor & Vu, 2006): Ein Fahrzeugführer lenkt damit schneller nach links, wenn sich eine Bedrohung von rechts her in eben diese Richtung bewegt, als wenn die Bedrohung von vorne kommt – wo eher das Bremsen eine kompatible Reaktion darstellt. Ein sich nur von vorne näherndes Hindernis (Längsverkehr) erzeugt außerdem nur sehr wenig optischen Fluss, während ein sich lateral zum Betrachter bewegendes Hindernis in dessen Auge weitaus schneller bewegt und daher auch leichter bemerkt und eher als Gefahr wahrgenommen wird.
- Für das Zutreffen der letztgenannten Hypothese lassen sich auch Belege in der Literatur finden. So berichten zum Beispiel Weber et al., 2015, von einer größeren Häufigkeit von Ausweichversuchen, wenn Querverkehr, der an einer Kreuzung die Vorfahrt missachtet, schneller beschleunigt. Aber auch das hier durchgeführte Experiment liefert Indizien: Entscheidend für

das Erleben des Fahrers (Kritikalität der Situation, Überraschung, Erschrecken, Angst, Schätzung der Unfallwahrscheinlichkeit) scheint vor allem die Hindernis-Geschwindigkeit zu sein, die auf viele seiner Urteile einen statistisch signifikanten Einfluss hat und auch am stärksten die Stärke der durchgeführten Brems- und Lenkreaktionen mitzubestimmen scheint. Dieses Ergebnis ist durchaus bemerkenswert: Obwohl der Unterschied in den Hindernis-Geschwindigkeiten mit etwa 15 % deutlich geringer war, als der Unterschied in den Hindernis-Abständen mit etwa 27 %, hatte letzterer auf das Fahrererleben kaum einen Einfluss. Dies stellt die in Kapitel 2.3.6 erwähnte und in der Literatur verbreitete Aussage, dass Fahrer die Kritikalität einer Situation nach der TTC bewerten, teilweise in Frage.

Nichtsdestotrotz wurde die TTC als entscheidender Einflussfaktor für die objektive Kritikalität der Situation (bei Konstanthalten aller anderen Größen) bestätigt, da sie einen maßgeblichen, statistisch signifikanten Effekt auf den lateralen Abstand zum Hindernis hatte, den die Fahrer beim Passieren des Hindernisses hergestellt hatten. Die Subjektivurteile der Fahrer erscheinen dabei aussagekräftig: Sie müssen nicht, wie befürchtet, wegen fehlender oder falscher Erinnerung aufgrund der Plötzlichkeit und Kürze der Situation (z.B. Hancock & de Ridder, 2003) und dem in ihr vorhandenen Stress (z.B. Schwabe, Wolf & Oitzl, 2010) als wertlos gelten. So korrelierte die objektive Kritikalität (lateraler Abstand zum Hindernis beim Passieren) durchaus signifikant mit dem Subjektivurteil zur Kritikalität der Situation (SBFV-Wert), die Lenkreaktionsstärke mit dem Subjektivurteil zur erweckten Handlungsbereitschaft, oder auch die Reaktionszeit positiv mit dem angegebenen Ausmaß erweckter Angst und negativ mit dem angegebenen Ausmaß erweckter Handlungsbereitschaft. Vor diesem Hintergrund erscheint es guten Gewissens vertretbar, Subjektivdaten auch in solchen Experimenten Gewicht zuzusprechen und sie ergänzend zu erhobenen Objektivdaten zum Erkenntnisgewinn einzusetzen. Interessant ist dabei, dass zwar die Lenkreaktionsstärke der Probanden v.a. mit dem angegebenen Ausmaß der erweckten Handlungsbereitschaft korrelierte, die Bremsreaktionsstärke der Probanden hingegen v.a. mit dem angegebenen Ausmaß der notwendigen Reaktionsstärke korrelierte – eine Unterscheidung, die in dieser Form nicht erwartet wurde und die bei künftigen Befragungen gesonderter Aufmerksamkeit verdient.

Die (um die Zeit zwischen Anforderung und erster Sichtbarkeit des Hindernisses bereinigte) Reaktionszeit belief sich auf etwa 750 ms. Dies erscheint im Vergleich recht gering. Dabei sei erneut darauf verwiesen (s.o.), dass sich schneller bewegende Reize schneller verarbeitet werden und schnellere Reaktionen hervorrufen, die Fahrer in diesem Szenario zudem nicht abgelenkt und in der Regel aufmerksam waren, und zudem darauf, dass für die hier angegebene Reaktionszeit die jeweils schnellste Reaktion (Lenken oder Bremsen) betrachtet wurde: die getrennten Lenk- und Bremsreaktionszeiten liegen somit höher. Dass zwei Probanden in der Gruppe mit geringem Hindernis-Abstand und langsamer Hindernis-Bewegung das Hindernis gar nicht bemerkten und in der Gruppe mit geringem Hindernis-

Abstand und schneller Hindernis-Bewegung zwei Probanden keine rechtzeitige Reaktion zeigten, ist ein Indiz dafür, dass die TTC von etwa 1.1 s bei erster Sichtbarkeit des Hindernisses bereits im Grenzbereich zu TTCs liegt, bei denen Fahrer keinen rechtzeitigen Einfluss mehr auf die Situation nehmen können. Vor dem Hintergrund, dass die Aufmerksamkeit von Fahrern im Rahmen einer Versuchsfahrt als höher angenommen werden darf, als vielfach im alltäglichen Straßenverkehr, und weil die Fahrt auf dem Teststgelände weniger ablenkende Reize bietet als der alltägliche Straßenverkehr, sind etablierte Richtwerte von mindestens 1,5 s als Reaktionszeit als voll gerechtfertigt zu betrachten. Für Fahrerexperimente erscheinen die hier gut bewältigten, niedrigen TTCs allerdings empfehlenswert zur Darstellung kritischer Situationen, für die – je nach Mindestdauer zur Ausführung der notwendigen Reaktion nach Reaktionsbeginn – die bisher häufig eingesetzten höheren TTC eher unkritisch erscheinen.

Festzuhalten bleibt vor allem die Erkenntnis, dass der Hindernis-Abstand durchaus objektiv die Kritikalität der Situation bestimmt, für das Fahrererleben und die Fahrerreaktion jedoch v.a. die Hindernis-Geschwindigkeit bestimmend scheint.

10. Gestaltungsempfehlungen

Eine Ausweichassistentz soll helfen, durch Vermeidung von Kollisionen im Straßenverkehr Leben zu retten und Verletzungen und anderen Unfallfolgen vorzubeugen. Um diesen Beitrag zu leisten, muss ein solches Fahrerassistenzsystem gebrauchstauglich gestaltet sein, damit es in seiner Interaktion mit dem Fahrzeugführer sowohl wirksam, als auch kontrollierbar ist. Im Rahmen dieser Arbeit wurde aus theoretischen Überlegungen sowie Erkenntnissen der Grundlagenforschung, der angewandten Forschung Dritter und eigener Vorstudien der Unterstützungsbedarf von Fahrern in Ausweichsituationen ermittelt. Darauf aufbauend wurden Konzepte für verschiedene Formen von Ausweichassistentz entworfen. Diese wurden in Fahrstudien auf ihre Wirksamkeit und Kontrollierbarkeit hin untersucht. Abschließend sollen, daraus abgeleitet, Gestaltungsempfehlungen für eine gebrauchstaugliche Ausweichassistentz gegeben werden.

10.1. Ausweichunterstützung

Eine optimale Ausweichunterstützung bietet eine intelligente Trajektorienführung, bei der Systemeingriffe die Steuervorgaben des Fahrers situationsadaptiv auf solche Weise ergänzen oder korrigieren, dass das Fahrzeug entlang einer optimalen Ausweichtrajektorie geführt wird. Ein solches System bildet den fließenden Übergang zu einer Ausweichautomatik (bei der lediglich die Einleitung eines Ausweichmanövers durch den Fahrer als zwingende Voraussetzung für den Systemeingriff entfällt). Gestaltungsempfehlungen zu solchen Systemeingriffen finden sich deshalb in Kapitel 10.3. Potenziell beinhaltet eine solche Ausweichunterstützung darüber hinaus zugleich die Funktion einer Ausweichempfehlung, zum Beispiel wenn der empfohlene Ausweichpfad zugleich visuell dargestellt wird. Für diesen Fall sollten die dafür herausgearbeiteten Gestaltungsempfehlungen (s. Kapitel 10.2) Beachtung und Anwendung finden.

Im Folgenden sollen einfachere Varianten einer Ausweichunterstützung betrachtet werden, die mit weitaus geringerem technischen Aufwand umgesetzt werden können, als o.a. Optimalfall. Am unteren Ende des Spektrums der Systemintelligenz ist die Ausweichunterstützung klar von einer Ausweichautomatik zu unterscheiden: Hier erfolgt ein Systemeingriff, der nicht in Echtzeit angepasst und im Extremfall sogar ohne Umfeldinformation (z.B. allein aufgrund einer schnellen Lenkbewegung des Fahrers) getätigt wird. Zur Gestaltung der Eingriffe solcher und nur geringfügig höher entwickelter Systeme lassen sich die folgenden Empfehlungen aussprechen, die im Folgenden einzeln erläutert werden sollen:

- Verwendung überlagernder Lenkmomente als Lenkhilfe,
- Verzicht auf steile Anstiegsgradienten bei Hilfsmomenten,
- Beschränkung der maximalen Stärke von Hilfsmomenten auf das vom Fahrer aufgebrachte Lenkmoment,
- Beschränkung der Dauer des Hilfsmoments auf den Zeitraum zwischen Lenkbeginn und Rücknahme des Lenkwinkels durch den Fahrer,
- Verzicht auf ergänzende Systemkomponenten.

Überlagernde Lenkmomente als Lenkhilfe.

Dies trägt dem Umstand Rechnung, dass überlagernde Lenkmomente eine Lenkunterstützung bieten, die dem Konzept der Ausweichunterstützung (der Fahrer führt das Manöver durch, das Assistenzsystem erleichtert die Durchführung) in der reinsten Form entsprechen: Durch Reduktion der zur Umsetzung der Lenkbewegung notwendigen Kraft, können überlagernde Lenkradmomente eine Lenkerleichterung herbeiführen, die den Fahrer unterstützt, ihm aber zugleich insofern die volle Kontrolle über die Querführung belässt, als dass keine Lenkbewegung herbeigeführt wird, die nicht auch am Lenkrad vollzogen wird (wie es beispielsweise bei einer einseitigen Bremsung oder beim Auftragen zusätzlichen Radlenkwinkels bei einer entkoppelten Lenkung der Fall wäre): Somit besteht direkte haptische Rückmeldung zur Aktivität der Lenkhilfe. Ein weiterer Vorteil der überlagernden Lenkradmomente ist, dass die haptische Krafrückmeldung direkt am Eingabegerät nach Erkenntnissen der Forschung führende Wirkung hat (vgl. Kapitel 2.3.4). Der Nachteil von überlagernden Lenkradmomenten – dass sie als externe Störung fehlinterpretiert und deshalb reflexhaft kompensiert werden können (s. Kapitel 2.4.5) – entfällt im Falle der Ausweichunterstützung, bei der die Situation durch den Fahrer bereits korrekt erfasst und verarbeitet, und die Lenkbewegung bereits eingeleitet wurde.

Vom Fahrer aufgebrachtes Lenkmoment als maximale Hilfsmomentstärke.

Bezüglich der Stärke der überlagernden Lenkmomente hat sich in den Studien gezeigt, dass auch solche, die deutlich größer sind, als die bisher in Serienfahrzeugen verbreitete Grenze von maximal drei Newtonmetern, einerseits nützlich und andererseits weitgehend kontrollierbar erscheinen. Das zusätzlich aufgebrachte Lenkradmoment sollte dabei jedoch keinesfalls höher sein, als das vom Fahrer aufgebrachte Moment. Dadurch wird einerseits vermieden, dass das Lenkrad den Fahrer „überholt“ und seine Hände (wenigstens kurzfristig) ein Lenkmoment in die Gegenrichtung ausüben, was nicht nur ineffizient ist, sondern möglicherweise auch eine unerwünschte Orientierungsreaktion auslöst. Andererseits bleibt dadurch ein Mindestmaß an Kontrollierbarkeit gewährleistet, da sicher gestellt ist, dass der Fahrer über die notwendige Kraft verfügt, ein vom System aufgebrachtes Lenkmoment in dieser Höhe zu negieren. Hierbei ist jedoch vor allem auch der Verlauf des Hilfsmoments entscheidend.

Keine steilen Anstiegsgradienten des Hilfsmoments

Zum Verlauf der überlagernden Lenkradmomente hat sich gezeigt, dass diese langsam auf- und abgebaut werden müssen, um dem Fahrer die Anpassung der von ihm aufgebrauchten Kräfte und damit einen harmonischen Lenkverlauf zu ermöglichen. Wurde ein starkes Hilfsmoment in kürzester möglicher Zeit auf voller Stärke angefordert, führte dies fast immer zu kurzzeitig entgegen gerichteten Handlenkmomenten der Fahrer und zudem zu deskriptiv selteneren erwünschten Fahrverläufen (also häufiger zu solchen, die entweder in einer Kollision oder in einem Abkommen von der Fahrbahn resultierten). Der Verzicht auf steile Gradienten sollte dabei auch bei der Rücknahme des Hilfsmoments beachtet werden.

Unterstützungsdauer von Lenkbeginn bis zur Lenkwinkelrücknahme

Die optimale Dauer von Hilfsmomenten ist stark von der konkreten Ausweichsituation abhängig. Der Eingriffszeitpunkt für eine Ausweichunterstützung ist dabei an die Reaktion des Fahrers gekoppelt: Ein überlagerndes Lenkmoment kann und sollte möglichst bald nach Einsetzen der Lenkbewegung aufgeschaltet werden (unter Berücksichtigung der Empfehlungen zum Verlauf des Hilfsmoments). Es sollte andererseits im Idealfall spätestens ab dem Zeitpunkt zurückgenommen werden (wieder unter Berücksichtigung der Empfehlungen zum Verlauf), an dem der Fahrer beginnt, den aufgebauten Lenkradwinkel wieder zu reduzieren (kleinere Korrekturbewegungen ausgeschlossen).

Keine ergänzenden Systemkomponenten

Beim Eingreifen einer Ausweichunterstützung hat der Fahrer die Fahrsituation bereits erfasst und die erwünschte Reaktion eingeleitet. Aus diesem Grund erscheinen weitere Assistenz-Komponenten im Rahmen einer Ausweichunterstützung als unnötig oder gar hinderlich: Sie bieten keinen Vorteil, aber dafür das Potenzial, den Fahrer in seiner Aufmerksamkeit zu stören und von der Verkehrssituation und seiner Fahraufgabe abzulenken. Der Einsatz einer begleitenden Anzeige, eines Warntons oder einer anderen zusätzlichen Komponente birgt das Risiko, eine Orientierungsreaktion auszulösen, die den Fahrer die Situation neu bewerten und sein Handeln neu planen lässt und führt dadurch zum Verlust wertvoller Zeit.

10.2. Ausweichempfehlung

Es gibt Belege dafür, dass eine Ausweichempfehlung wirksam sein kann (z.B. Kleen & Schmidt, 2009; Weber, 2012). Auch die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Experimente weisen deskriptiv auf die Wirksamkeit von Ausweichempfehlungen hin. Dabei war das Ausmaß der Wirksamkeit in den untersuchten Szenarien jedoch sowohl bei aufmerksamen als auch bei abgelenkten Fahrern nicht sta-

tistisch nachweisbar und die positiven Effekte möglicherweise v.a. der begleitend durchgeführten automatischen Teilbremsung (und entsprechenden Vergrößerung der ETTC) zuzuschreiben. Auch eine in Kooperation mit der AUDI AG durchgeführte Studie (Müller, Sieber, Siedersberger, Popp & Färber, 2017), in der eine aktive Wankbewegung des Fahrzeugs in Ausweichrichtung als haptisches bzw. vestibuläres Signal für eine Ausweichempfehlung verwendet wurde, wies im gegebenen Szenario (niedrige TTC, Querverkehr als Hindernis, sehr kleiner benötigter Querversatz) keine Wirksamkeit der Ausweichempfehlung gegenüber der Kontrollgruppe nach. In den zur hier abgedruckten Arbeit durchgeführten Studien wurde dabei häufig beobachtet, dass die Ausweichempfehlung als automatisches Ausweichmanöver missverstanden oder schlicht nicht bewusst bemerkt wurde. Für eine Ausweichempfehlung lassen sich folgende Gestaltungsempfehlungen geben:

- Einsatz vor allem bei Kollisionsgefahr im Längsverkehr,
- Einsatz möglichst nur mit zusätzlicher Rückfallebene (z.B. Ausweichautomatik, ANB),
- Eingriffszeitpunkt mindestens 1,5 s vor Kollision,
- Verwendung einer begleitenden Teilbremsung (mit Gurtstraffer),
- Verwendung eines multimodalen Anzeigekonzepts,
- Verwendung (situationsadaptiv) deutlicher Signale.

Größtes Potenzial im Längsverkehr

Die Ausweichempfehlung hat ihr größtes Wirkpotenzial bei Kollisionsgefahr im Längsverkehr. Die Erkenntnisse aus den Kapiteln 2.3.1, 2.3.6 und 9.5 belegen, dass ein Fahrzeugführer ein querendes Objekt eher bemerkt, eher als Gefahr wahrnimmt und darauf wahrscheinlicher mit einer Lenkreaktion reagiert, als ein Objekt, das genau auf ihn zukommt. Für die Fahrzeugsensorik gilt eher das Gegenteil: Sie sieht in aller Regel am besten in Fahrtrichtung. Denn dorthin sind die Sensoren mit der größten Reichweite gerichtet und dort sind tendenziell die wenigsten störenden Objekte, die Sensorschatten werfen. Fahrer und Fahrzeug können einander deshalb auf nützliche Weise ergänzen: Wo die Sensorik Objekte, die sich von der Seite nähern, nur schwer erkennt, braucht der Fahrer am wenigsten Unterstützung. Dort, wo die Sensorik glänzt, nämlich bei der Abstandsmessung zu vorausfahrenden Fahrzeugen, besteht am meisten Unterstützungsbedarf. Eine Ausweichempfehlung sollte also vor allem auf Situationen, die sich im Längsverkehr ergeben, angewendet werden, um den Fahrer einerseits auf die Gefahr hinzuweisen, und ihn andererseits zu einem Lenkmanöver zu animieren.

Bedarf einer Rückfallebene

Eine Ausweichempfehlung muss vom Fahrer zunächst bemerkt, korrekt interpretiert und dann umgesetzt werden. Je nach Ausmaß der Zeitreserven ist ihre Wirksamkeit deshalb unter Umständen nicht gegeben. Aus diesem Grund sollte eine Ausweichempfehlung möglichst nicht die letzte Stufe einer

Ein Zahlenbeispiel:

Ein Pkw von 2 m Breite parkt längs zur Fahrbahn am Straßenrand und steht zur Hälfte auf dem 3,5 m breiten Fahrstreifen. Ein mittig im Fahrstreifen fahrendes Ego-Fahrzeug mit einer Breite von ebenfalls 2 m kann bei einer Geschwindigkeit von 50 kmh^{-1} und einer Lenkansprechzeit von 0,1 s noch bis etwa 14 m vor dem Hindernis (also bei einer TTC von etwa 1 s) ein Komfortausweichen durch einen Fahrstreifenwechsel starten, ohne dabei einen Sicherheitsabstand von 0,5 m zum Hindernis zu unterschreiten oder eine Querschleunigung von 2 ms^{-2} (im alltäglichen Verkehr bei Fahrstreifenwechseln beobachtbar, Weber, 2012) zu überschreiten.

Kaskade von Systemeingriffen bei Kollisionsgefahr darstellen. Am Ende einer solchen Kaskade sollte eine Ausweichautomatik oder eine ANB als Rückfallebene zur Verfügung stehen, die eine Kollision im letzten Moment auch ohne Zutun des Fahrers verhindern oder zumindest abschwächen kann.

Eingriffszeitpunkt frühzeitig

Beim Eingriffszeitpunkt für eine Ausweichempfehlung muss berücksichtigt werden, dass der Fahrer die Empfehlung und/oder die Fahrsituation zunächst erfassen und bewerten und im Anschluss sein Handeln planen und umsetzen muss. Die dafür benötigte Zeit unterscheidet sich zwischen verschiedenen Szenarien vor allem durch die für die Ausführung einer Handlung (ab Reaktionsbeginn), also zur Herstellung des jeweiligen Querversatzes, benötigte Zeit. Die Fahrstudien haben jedoch gezeigt, dass diese Zeitspanne bei niedrigen Zeitreserven den geringen Anteil ausmacht, sondern selbst bei aufmerksamen Fahrern zunächst etwa 750 ms vergehen, ehe eine Handlung überhaupt beginnt. Während ein Zeitraum von 1 s vor diesem Hintergrund sehr knapp erscheint, steigt die Wahrscheinlichkeit einer rechtzeitigen Fahrerreaktion mit jeder Zehntelsekunde darüber hinaus deutlich an. Donges (2009) empfiehlt ein Mindestzeitfenster von 2 s für Systeme, die eine Fahrerreaktion verlangen. Gerade bei kleinem benötigten Querversatz erscheint diese Zeitspanne jedoch etwas hoch und ginge mit einer unnötig hohen Zahl unberechtigter Auslösungen einher (siehe Zahlenbeispiel), die die Akzeptanz des Systems mindern können. Im Idealfall bestimmt das System den Eingriffszeitpunkt abhängig vom zum Ausweichen nötigen Querversatz sowie dem Aufmerksamkeitszustand des Fahrers. Dies erfordert eine präzise Umfelderkennung sowie eine reliable Fahrerüberwachung. Als Richtwert für ein System, das über keine passende Sensorik verfügt, kann ein Mindest-Zeitfenster von 1,5 s angepeilt werden.

Nutzung einer begleitenden Teilbremsung (mit Gurtstraffer-Einsatz)

Eine Ausweichempfehlung sollte von einer Teilbremsung begleitet werden. Sie erfüllt mehrere Funktionen: Sie kann eine Orientierungsreaktion des Fahrers auslösen, falls dieser das Verkehrsgeschehen gerade nicht beachtet. Sie kann dem Fahrer mehr Zeitreserven für eine Reaktion verschaffen und sie kann die Aufprallenergie im Falle einer erfolglosen Kollisionsvermeidung vermindern. Dabei sollte

die Intensität der Teilbremsung an der oberen Grenze einer komfortablen Verzögerung, etwa um 3 ms^{-2} , liegen. Die automatische Teilbremsung sollte dabei auf keinen Fall dazu beitragen, einen fahrdynamisch instabilen Zustand herbeizuführen, d.h. im Falle einer sehr hohen Querschleunigung sollte die Verzögerung reduziert oder gänzlich ausgesetzt werden, ehe sich ein Beschleunigungsvektor von 9 ms^{-2} aufsummiert – oder bei Fahrbahnzuständen mit geringer Haftung deutlich früher. Um dem Fahrer durch das entstehende Trägheitsmoment nicht das Lenken zu erschweren, sollte gleichzeitig ein (reversibler) Gurtstraffer eingesetzt werden, der den Fahrer mithilfe des Sicherheitsgurtes gegen die Rückenlehne fixiert.

Multimodales Anzeigekonzept

Die Ausweichempfehlung sollte multimodal sein. Dies dient sowohl dazu, die Wahrscheinlichkeit zu maximieren, überhaupt vom Fahrer bemerkt zu werden, als auch dazu, ihren Aufforderungscharakter zu erhöhen. Während sich haptische oder vestibuläre Signale, die schnell verarbeitet werden und zugleich die erwünschte motorische Reaktion bahnen (z.B. ein Lenkraddruck oder ein einseitiger Bremsruck), besonders eignen, sind auch Warnton oder Warnanzeige nützlich. Diese können vor allem verhindern helfen, dass der Fahrer ein haptisches oder vestibuläres Signal einer unerwünschten Störung zuschreibt und es unterdrückt. Eine Anzeige sollte sich dabei in der Windschutzscheibe (im Idealfall kontaktanalog) befinden, um keine Blickabwendung von der Straße und dem Verkehrsgeschehen (z.B. in das Kombi-Instrument) zu erfordern. Ein Signalton sollte deutlich von den akustischen Meldungen zu unterscheiden sein, die dem Fahrer im Fahralltag häufiger begegnen (z.B. ACC-Übernahmeaufforderung) und die Kritikalität der gegebenen Situation somit nicht angemessen transportieren.

Situationsadaptiv deutliche Signale

Die Signalgestaltung muss einerseits sehr deutlich ausfallen: Die Ausweichempfehlung muss für den Fahrer leicht bemerkbar sein. Dabei muss jedoch darauf geachtet werden, dass ein Signal, das über einen Lenkaktor vermittelt wird (z.B. Lenkraddruck oder einseitige Bremsung) sich möglichst wenig auf den Fahrverlauf auswirkt, um einerseits kontrollierbar zu bleiben, und andererseits die Gefahr zu minimieren, als Ausweichautomatik missverstanden zu werden. Vor allem die letztgenannte Gefahr muss auch bei der Gestaltung etwaiger begleitender Anzeigen beachtet und minimiert werden, um zu verhindern, dass der Fahrer fälschlicherweise untätig bleibt, weil er glaubt, die Ausweichassistentz übernehme die Fahrzeugführung. Zudem muss Sorge getragen werden, dass nicht zu viele und zu saliente Signale die Aufmerksamkeit des Fahrers nicht nur erregen, sondern an sich binden (siehe Färber, 1987, für einen Überblick über die Theorien zur geteilten und selektiven Aufmerksamkeit und ihrer Implikationen für die Gestaltung von Mensch-Maschine-Schnittstellen im Fahrzeug). Im besten Fall werden die Signale deshalb situativ angepasst: Das Infotainmentsystem sollte im Falle einer

Notausweichsituation stumm geschaltet werden. Eine Anzeige sollte bei Tageslicht sehr hell eingestellt sein, um ausreichend Kontrast zu bieten, in der Dunkelheit hingegen weniger intensiv leuchten, um dem Fahrer nicht das Erkennen der Fahrsituation zu erschweren. In den Fahrstudien haben sich Anzeigen, die detailreich waren und länger eingeblendet wurden, eher als Hinweis auf den Eingriff einer Ausweichautomatik interpretiert: Als Anzeige sinnvoll erscheint deshalb eine kurze Folge salienter Lichtblitze, die mit hoher Wahrscheinlichkeit die Aufmerksamkeit des Fahrers erregen, danach aber keine Ablenkung vom Verkehrsgeschehen bieten, auf das der Fahrer reagieren soll. Setzt man eine Fahrerüberwachung voraus, ist es auch möglich, die Signalkombination, derer sich eine Ausweichempfehlung bedient, an den aktuellen Fahrerzustand anzupassen – und bspw. einen Warnton statt einer Anzeige zu nutzen, wenn der Fahrer gerade in Richtung Fahrzeugheck gewandt ist.

10.3. Ausweichautomatik

Eine Ausweichautomatik muss in der Lage sein, die Fahrzeugquerführung in einem Ausweichszenario vollständig zu übernehmen. Für die Gestaltung des Systemeingriffs lassen sich folgende Empfehlungen geben:

- Eingriffszeitpunkt so früh wie nötig, so spät wie möglich,
- Verwendung einer begleitenden Teilbremsung (mit Gurtstraffer),
- Möglichst harmonischer Lenkverlauf,
- Plausibilisierung des Eingriffs durch multimodale Rückmeldung.

Eingriff so früh wie nötig, so spät wie möglich

Um den Fahrer nicht zu bevormunden, sollte eine Ausweichautomatik erst dann eingreifen, wenn der spätest mögliche Zeitpunkt erreicht ist, an dem die Kollision fahrphysikalisch noch erfolgreich verhindert werden kann. Dies ermöglicht zugleich die längere Beobachtung des Situationsverlaufs und erleichtert die Prädiktion des Situationsausgangs: So wird implizit das Risiko eines ungünstigen Systemeingriffs minimiert. Dabei sollte, neben einem angemessenen pauschalen Sicherheitsbeiwert, auch berücksichtigt werden, dass der Fahrer den Eingriff gerade zu Beginn potentiell stark abschwächen kann. Zusätzlich zur sich aus den Systemeigenschaften (z.B. Ansprechzeit der Lenkung, maximale Lenkradwinkelgeschwindigkeit des Aktors) ergebenden Mindestzeit für das Ausweichmanöver sollten weitere ca. 300 ms aufgeschlagen werden, in denen der Fahrer möglicherweise noch unbewusst reagiert und einen systemseitigen Lenkeingriff womöglich unabsichtlich dämpft.

Nutzung einer begleitenden Teilbremsung

Die Ausweichautomatik sollte von einer teilweisen Bremsung begleitet werden. Die Gründe und Gestaltungsempfehlungen hierfür sind die gleichen, wie bei der Ausweichempfehlung (s.o.). Die dadurch

gewonnenen Zeitreserven dienen jedoch nicht nur dafür, dem Fahrer mehr Zeit für eine Reaktion zu verschaffen (z.B. um etwaigen Widerstand gegen den Lenkeingriff fallen zu lassen, oder um einen unberechtigten Eingriff zu übersteuern), sondern auch dafür, dem System noch mehr Zeit zur Beobachtung der Fahrsituation zur Verfügung zu stellen, damit Ausweichpfad und Lenkeingriff bestmöglich angepasst werden können. Die Teilbremsung darf dabei bereits früher eingreifen, als der Lenkeingriff der Ausweichautomatik (z.B. bereits im Rahmen einer Kaskade von Systemeingriffen, die zunächst mit einer Ausweichempfehlung beginnt).

Harmonischer Lenkverlauf

Die Parametrierung eines Lenkeingriffs entscheidet darüber, wie viel Widerstand der Fahrer ihm entgegen bringt. Der Verlauf des Lenkeingriffs einer Ausweichautomatik sollte möglichst „fließend“ (z.B. sinusförmig) sein, um plötzliche Lenkmomentänderungen am Lenkrad und darauf folgende kompensatorische Fahrerreaktionen zu vermeiden. Der Lenkeingriff sollte zudem nicht nur das Auslenken des Fahrzeugs aus seiner ursprünglichen Fahrtrichtung, sondern auf jeden Fall auch das Einlenken parallel zur ursprünglichen Fahrtrichtung (oder dem jeweiligen Straßenverlauf, falls das Ausweichmanöver nicht auf gerader Strecke stattfindet) umfassen. Lenkt das System nur aus um den unmittelbar drohenden Zusammenstoß zu vermeiden, „fängt“ das Fahrzeug aber nicht wieder ein, besteht aufgrund der Erwartungshaltung des Fahrers, der den Eingriff zulässt, die Gefahr, dass er die Querführung nicht rechtzeitig wieder eigenverantwortlich übernimmt, um ein Verlassen der Fahrbahn zu verhindern.

Multimodale Plausibilisierung

Eine Ausweichautomatik sollte multimodal Rückmeldung geben, um dem Fahrer bewusst zu machen, dass das, was für ihn unerwarteter Weise mit seinem Fahrzeug geschieht, ein gezieltes und absichtliches Verhalten darstellt. Hierzu sind beispielsweise Anzeigen geeignet, die während des gesamten Systemeingriffs aktiv geschaltet und vom Inhalt her aussagekräftig sind. Obwohl Anzeigen in der Praxis in kritischen Ausweichsituationen häufig nicht bewusst wahrgenommen werden, können sie in den anderen Fällen dabei helfen, Widerstand des Fahrers gegen den Lenkeingriff zu mindern und ihn möglicherweise zur aktiven Kooperation bewegen. Häufiger bemerkt als eine Anzeige wird ein begleitender Warnton. Ein solcher empfiehlt sich stark als Teil einer Ausweichautomatik: die durchgeführten Experimente deuten darauf hin, dass dieser sowohl die Wirksamkeit, als auch zugleich die Kontrollierbarkeit einer Ausweich-Notmanövers erhöht und kann ohne zusätzliche Hardware in jedem Fahrzeug genutzt werden.

11. Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Mit dieser Arbeit wurde ein Beitrag zur Erforschung der Mensch-Maschine-Interaktion im Rahmen von Ausweichassistenten geleistet. Darin wurde ein Teil der Antwort auf die Frage gefunden, wie Ausweichassistenten nutzergerecht gestaltet werden kann. Manche Aspekte bleiben jedoch unerforscht und erzeugen den Bedarf nach weiteren Fahrstudien.

Fahrsituationen, die ein Notausweichen erforderlich machen, unterscheiden sich hinsichtlich zahlreicher Parameter, die wiederum als Einflussgrößen auf die Interaktion von Fahrer und Ausweichassistenten wirken können. Aufgrund dieser Komplexität erscheint es erforderlich, die in Kapitel 10 gegebenen Gestaltungsempfehlungen für Fahrscenarien zu validieren, die im Rahmen der hier abgedruckten Arbeit nicht untersucht wurden. Dazu gehören zum Beispiel andere (v.a. höhere) Fahrgeschwindigkeiten, anderer (v.a. größerer) benötigter Ausweich-Querversatz, andere Arten von Hindernissen (z.B. Fußgänger, Radfahrer, Tiere), andere Fahrzeuge (z.B. Lastkraftwagen) oder eine andere Lenkübersetzung.

Die vorliegende Arbeit ließ zudem einige Aspekte der nutzergerechten Gestaltung von Ausweichassistenten gänzlich unerforscht. Dazu gehört u.a. die Kontrollierbarkeit von Ausweichassistenten aus Sicht anderer Verkehrsteilnehmer. Es wurde angeführt, dass hierzu zwar zum Beispiel von Rüter et al. (2015) bereits erste Untersuchungen gemacht wurden. Dabei wurden jedoch keine Konzepte zur Absicherung getestet, die im Rahmen der nutzergerechten Gestaltung denkbar wären: zum Beispiel eine während des Notausweichens automatisch aktive Warnblinkanlage oder blinkende Bremsleuchten, wie sie analog in der Fahrzeuglängsführung bereits Einsatz finden. Weitere Beispiele für nicht untersuchte Aspekte betreffen den kontrollierten Abbruch eines Systemeingriffs. Ein solcher wird notwendig, wenn entweder ein Übersteuerungswunsch seitens des Fahrers erkannt wird (was an sich bereits weiterer Forschung bedarf), oder wenn eine Kollision im Verlauf des Manövers unvermeidlich wird und die Fortsetzung des Systemeingriffs zu einer ungünstigeren Unfallkonstellation führen würde, die eine stärkere Gefährdung der Unfallbeteiligten zur Folge hätte.

Nicht zuletzt konnte in den vorgestellten Studien nur eine kleine Auswahl möglicher Parametrierungen und Konzepte getestet werden. Bei der Entwicklung einer Ausweichassistenten für den serienmäßigen Einsatz sollte in die Feinabstimmung der gewählten Parametrierung investiert werden. Dabei ist auch die Betrachtung der Handhaltung der Fahrer am Lenkrad von besonderem Interesse: eine Variable, die zwar im Rahmen der hier durchgeführten Versuche mit erhoben, jedoch noch nicht ausgewertet wurde. Ein zusätzlicher Erkenntnisgewinn ist darüber hinaus von Studien zu erwarten, die sich mit Interaktionskonzepten befassen, die in dieser Arbeit noch nicht untersucht wurden: zum Bei-

spiel eine Ausweichempfehlung mittels intelligentem Scheinwerferlicht (das die empfohlene Ausweichtrajektorie beispielsweise durch intensivere oder ausschließliche Ausleuchtung auf die Fahrbahn projiziert) oder eine Ausweichautomatik mit entkoppelter Lenkung (steer-by-wire).

Die nutzergerechte Gestaltung einer Ausweichassistentz ist eine der größten Herausforderungen auf dem Weg zu ihrer erfolgreichen Umsetzung. Es gibt jedoch weitere Hürden, die nicht ungenannt bleiben sollen. Ein besonderer Stellenwert kommt dabei der Umfeldsensorik (und der Informationsverarbeitung) des Fahrzeugs zu, die für die Realisierung von Ausweichassistentz zugleich größter Förderer sowie auch größter Behinderer sein kann. Eine breite Palette an Sensoren, die vielfach bereits serienmäßig verbaut sind, schafft grundsätzlich großes Potenzial. Da viele relevante Szenarien jedoch weder statisch sind, noch nur sich gleichförmig bewegende Objekte beinhalten, ist der zur Verfügung stehende Manövrierraum meist mit hoher Unsicherheit belegt und das Bestimmen einer sicheren Ausweichtrajektorie deshalb nicht trivial. Darüber hinaus bestehen bei der Umfeldwahrnehmung durch Fahrzeugsensoren Schwachpunkte, zum Beispiel bei der frühzeitigen Erkennung von Querverkehr: Übliche Fahrzeugsensorik vermag nicht durch feste Objekte wie Gebäude hindurch zu blicken und verfügt daher unter anderem nicht über die Information, was sich in der nächsten Querstraße hinter einer Häuserecke zuträgt. Diese Informationslücke könnte durch Fahrzeug-zu-Fahrzeug- oder Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Kommunikation (car-2-x) gedeckt werden. Auch bei für die Sensorik sichtbaren Objekten bestehen jedoch Interpretationsschwächen, beispielsweise beim Erkennen von Absichten anderer Verkehrsteilnehmer, was die Unsicherheit bei der Bewegungsvorhersage vergrößert. Die Schwäche beim Erkennen von Absichten betrifft gleichsam den Ego-Fahrer: um ihm bestmöglich assistieren zu können, sollte ein FAS idealerweise dessen (Fahr-)Intention kennen. Eine solche Funktionalität bieten Fahrzeuge bisher kaum – trotz zahlreicher Bemühungen, im Rahmen der Verhaltens- und Absichtskennung das vom Fahrer geplante Manöver zu präzisieren (z.B. UR:BAN, 2013).

Das sich aus den Unsicherheiten über das Fahrzeugumfeld und die Fahrerabsicht ergebende Risiko beim Einsatz von Ausweichassistentz ist auch im Hinblick auf rechtliche Fragen ein Hindernis. Fahrzeughersteller könnten entscheiden, auf das Potenzial von Ausweichassistentz zu verzichten, solange das Risiko von Produkthaftungsklagen und damit einhergehendem Image-Verlust hoch ist. Juristische und haftungstechnische Aspekte setzen somit letztlich ebenfalls Grenzen für den Einsatz und die Wirksamkeit von Ausweichassistentz.

Trotz all dieser Grenzen und des weiteren Forschungsbedarfs ist anzunehmen, dass Ausweichassistentzsysteme zeitnah in großer Zahl in Serienfahrzeuge Einzug erhalten. Dafür spricht zum einen die zunehmende Verbreitung relevanter Sensorik (zum Beispiel Radar) im Rahmen der zunehmenden Marktdurchdringung anderer Fahrerassistenzsysteme (zum Beispiel ACC) auch bei Fahrzeugmodellen des Mittelklasse- oder Kleinwagensegments. Dadurch wird es künftig einem Großteil der Fahrzeuge möglich sein, Objekte in ihrem Umfeld auch auf größere Entfernung zu erfassen und die grundlegende

Voraussetzung für eine Ausweichassistentz in Form von -empfehlung oder -automatik zu erfüllen. Zum anderen sprechen die raschen Fortschritte im Bereich des hochautomatisierten Fahrens für eine baldige Verbreitung von Ausweichassistenten. Im Rahmen der Forschung auf diesem Gebiet nehmen die Informationsverarbeitungskapazitäten von Fahrzeugen stark zu, ebenso wie die Erfahrung mit der Erfassung und Prädiktion von Bewegungen anderer Verkehrsteilnehmer. Diese Entwicklung wird immer leistungsfähigere „intelligente“ Ausweichassistentz ermöglichen und die ihr aktuell gesetzten Grenzen aufweichen.

Die Lücke zur optimalen Gestaltung der Mensch-Maschine-Interaktion für Ausweichassistentz wird mit dem Beitrag der vorliegenden Arbeit und der Arbeit der zahlreichen Kollegen in Forschung und Entwicklung, die sich mit diesem Thema an Universitäten, bei Automobilherstellern und -zulieferern befassen und befasst haben, zunehmend geschlossen, womit auch diese Hürde als im Fallen begriffen gelten darf. Als Beleg des bevorstehenden Durchbruchs von Ausweichassistentz für Serienfahrzeuge darf die bereits 2015 erfolgte Einführung einer Ausweichunterstützung im Rahmen des Audi Pre Sense Front gelten. Es ist zu hoffen, dass vergleichbare oder ähnliche Systeme große Verbreitung in möglichst vielen Fahrzeugmodellen möglichst vieler Hersteller erlangen und dabei stetige Fortentwicklung erfahren, um – mithilfe einer nutzergerechten Gestaltung – einen möglichst großen Beitrag zur Erhöhung der Sicherheit im Straßenverkehr zu liefern.

12. Zusammenfassung

Die hier abgedruckte Arbeit beschäftigt sich mit der nutzergerechten Auslegung von Ausweichassistenten in Kraftfahrzeugen. Es wurde zunächst der Unterstützungsbedarf von Fahrern beim Ausweichen ermittelt. Anschließend wurden drei Arten von Ausweichassistenten (Unterstützung, Empfehlung, Automatik) postuliert und zugehörige Schnittstellenkonzepte erarbeitet, die in Probandenstudien auf ihre Gebrauchstauglichkeit hin evaluiert wurden. Aus den Ergebnissen dieser Evaluierungen wurden abschließend Gestaltungsempfehlungen für eine nutzergerechte Auslegung abgeleitet.

Aufgrund unserer Lebensweise sind wir auf den Straßenverkehr angewiesen, in dem es jedoch zu zahlreichen Unfällen kommt, deren Auswirkungen teils dramatisch sind und regelmäßig sogar den Verlust von Menschenleben einschließen. Da Straßenverkehrsunfälle häufig menschlichen Fehlern geschuldet sind, wird Fahrerassistenzsystemen (FAS), die den Fahrer bei seinen Aufgaben unterstützen und seine Schwächen dabei kompensieren sollen, großes Potenzial für die Lösung dieses Problems zugesprochen.

Zur Kollisionsvermeidung stehen grundsätzlich zwei Strategien zur Verfügung: Bremsen und Ausweichen. Bremsassistentensysteme sind in modernen Fahrzeugen serienmäßig verbaut und können den Fahrer in kritischen Situationen, die ein Bremsmanöver erforderlich machen, oft auf vielfältige Weise unterstützen. FAS für das Ausweichen befinden sich seit vielen Jahren in der Entwicklung, haben jedoch noch keine Verbreitung erfahren. In diesem Missstand liegt ungenutztes Unfallvermeidungspotenzial brach, denn ein Ausweichmanöver kann einen Unfall in manchen Situationen noch verhindern, in denen Bremsen fahrphysikalisch nicht mehr zum Erfolg führen kann. Eine Ausweichassistenten stellt jedoch nicht nur hohe Anforderungen an die maschinelle Wahrnehmung und Informationsverarbeitung: die Wirksamkeit und die Kontrollierbarkeit einer solchen Assistenten hängen auch in hohem Maße von der Qualität der Fahrer-System-Interaktion ab. Dies trifft noch stärker auf Ausweichassistenten als auf Bremsassistenten zu, denn einem Systemeingriff zuwiderlaufende Fahrereingaben können in der Fahrzeugquerführung, im Gegensatz zur -längsführung, nicht aus dem Regelkreis herausgenommen werden. Sie stellen somit eine besondere Herausforderung dar, die eine nutzergerechte Systemauslegung umso dringlicher erforderlich macht. Eine nutzergerechte Auslegung setzt voraus, dass zunächst die relevanten Eigenschaften des Benutzers und des Nutzungskontexts, sowie der Unterstützungsbedarf des Nutzers untersucht werden.

Die Analyse von Unfalldaten und Fahrstudien zeigt, dass Fahrer in Situationen, die ein Ausweichmanöver verlangen, ein solches selten einleiten oder es nicht erfolgreich abschließen: Fahrer reagieren teils gar nicht, teils zu spät, bremsen nur und lenken nicht, lenken zu wenig, oder lenken zu viel. Um

diesen vielseitigen Unterstützungsbedarf von Fahrern beim Ausweichen zu decken, wurden drei verschiedene Arten von Ausweichassistenten konzipiert:

- Eine Ausweichassistenten, die den Fahrer zur Einleitung eines Ausweichmanövers auffordert (Ausweichempfehlung),
- eine Ausweichassistenten, die den Fahrer bei der Durchführung eines eingeleiteten Ausweichmanövers durch Lenkhilfen unterstützt (Ausweichunterstützung), und
- eine Ausweichassistenten, die ein Ausweichmanöver selbsttätig und unabhängig vom Zutun des Fahrers einleitet (Ausweichautomatik).

Anhand der Eigenschaften relevanter Fahrsituationen, der Eigenschaften des Fahrers (insbesondere Erkenntnisse zu seinem für Ausweichsituationen relevanten Verhalten und zu seiner für die Fahrzeugführung relevanten Wahrnehmung) sowie der Eigenschaften der im Fahrzeug für die Interaktion mit dem Fahrer oder die Fahrzeugführung nutzbare Aktorik, wurde für jede dieser Arten von Ausweichassistenten eine konkrete Schnittstellengestaltung herausgearbeitet. Diese prototypischen Schnittstellen wurden anschließend in Nutzerstudien auf ihre Gebrauchstauglichkeit hin evaluiert.

Experiment 1 befasste sich mit Ausweichunterstützung in Form zusätzlicher Lenkmomente, die bei einem fahrerinitiierten Ausweichmanöver vom Assistenzsystem aufgebracht werden. Hierbei wurde in einer Fahrstudie mit 49 Probanden untersucht, welchen Einfluss die Stärke (in zwei Abstufungen) und der Verlauf („Rechteck“ versus „Trapez“ versus „Dreieck“) der Hilfsmomente haben. Die Fahrer erlebten mehrere berechtigte Eingriffe der Ausweichunterstützung mit Hindernissen sowohl im Längs- als auch im Querverkehr, sowie eine unberechtigte Auslösung der Ausweichunterstützung bei einer Kurvenfahrt. Dabei kam ein vehicle in the loop (VIL)-Fahrsimulator zum Einsatz. Ein Teil der Studie wurde zugleich als Realfahrt auf dem Testgelände absolviert. Die Studie ergab zum einen, dass die mit dem VIL-Fahrsimulator gewonnen Verhaltensdaten keine absolute, aber relative Verhaltensvalidität nach Blaauw (1982) und Godley (2002) besitzen: Das Querführungsverhalten fiel im VIL-Fahrsimulator insgesamt schwächer aus, als in der Realität, unterlag aber dem gleichen Einfluss (in Richtung und Ausmaß) durch die Hilfsmomente. Bezüglich dieser ergab die Studie zum anderen, dass die stärkeren Hilfsmomente (die über die Stärke bisher serienmäßig eingesetzter Querführungseingriffe wie im Rahmen eines Spurhalteassistenten deutlich hinausgehen) die Wirksamkeit einer Ausweichunterstützung erhöhen können. Gleichzeitig deuteten sich Grenzen der Kontrollierbarkeit an. Eine entscheidende moderierende Wirkung, sowohl auf Wirksamkeit wie auch auf Kontrollierbarkeit, hatte der Verlauf des Hilfsmoments: Ein Verzicht auf steile Anstiegsgradienten erwies sich für beide Kriterien als vorteilhaft.

Experiment 2 befasste sich mit Ausweichempfehlungen. Die getesteten Systemvarianten bestanden aus einer von zwei Anzeigen in Kombination mit einem von zwei Lenkeingriffen (Lenkraddruck versus

einseitig gewichteter Bremsruck), jeweils begleitet von einer Teilbremsung. In einer Fahrstudie mit 60 Probanden wurde untersucht, wie sich die Systemvarianten im Vergleich mit einer unassistierten Kontrollgruppe auswirken. Die Fahrer erlebten je einen berechtigten Eingriff der Ausweichempfehlung mit freiem und einen mit belegtem Gegenfahrstreifen, sowie eine unberechtigte Auslösung der Ausweichempfehlung auf freier, gerader Strecke. Alle Fahrten wurden als Realfahrt auf einem Testgelände unter Verwendung der Hindernisattrappe CAPLOS (compressed air powered laterally approaching obstacle simulator) durchgeführt. Sowohl die Anzeigen, als auch die Lenkeingriffe, wurden in vielen Fällen nicht bewusst wahrgenommen oder aber (vor allem die Anzeige „Ausweichpfeil“) sogar als Eingriff einer Ausweichautomatik fehlinterpretiert. Eine Wirksamkeit der Ausweichempfehlungen deutete sich in den Daten zwar deskriptiv an, konnte aber statistisch nicht belegt werden. Die tendenzielle Wirksamkeit ist darüber hinaus möglicherweise vorrangig der begleitenden Teilbremsung geschuldet. Die Kontrollierbarkeit der Systemvarianten war sowohl im Falle der berechtigten, wie auch im Falle der unberechtigten Auslösung ausreichend, wobei in mehreren Fällen starke Bremsungen beobachtet wurden, die das Potenzial bergen, nachfolgenden Verkehr zu gefährden. Dabei führten die Varianten mit einseitig gewichtetem Bremsruck zu signifikant geringerem Querversatz im Fehlerfall, als die Varianten mit Lenkraddruck, dafür zu deskriptiv stärkerer Längsverzögerung.

Experiment 3 befasste sich mit Ausweichautomatik. Die getesteten Systemvarianten setzten sich aus einer Anzeige und Lenkeingriffen zur Trajektorienführung zusammen, die entweder nur über Lenkmomentüberlagerung, oder über Lenkmomentüberlagerung in Kombination mit einseitig gewichteter Bremsung umgesetzt waren. Bei allen Systemvarianten wurde eine begleitende Teilbremsung angefordert. Bei zwei von drei Varianten ertönte während des Eingriffs zusätzlich ein Warnton. In einer Fahrstudie mit 64 Probanden wurde untersucht, wie sich diese Ausweichautomatiken im Vergleich zu einer nicht assistierten Kontrollgruppe und einer Probandengruppe mit einer der Ausweichempfehlungen aus Experiment 2 auswirken. Die Fahrer erlebten einen berechtigten Eingriff der Ausweichautomatik, während ihr Blick durch eine Nebenaufgabe seitlich abgewendet war, und eine unberechtigte Auslösung der Ausweichautomatik, jeweils auf gerader Strecke. Alle Fahrten wurden als Realfahrt auf einem Testgelände unter Verwendung der Hindernisattrappe CAPLOS durchgeführt. Die unassistierte Kontrollgruppe meisterte das Szenario trotz Ablenkung und geringer Zeitreserven sehr gut. Es zeigte sich statistisch kein Einfluss der Ausweichempfehlung. Die drei Varianten der Ausweichautomatik hatten unterschiedliche Auswirkung: Statistisch nachweisbare Wirksamkeit zeigte sich für die Systemvarianten mit Warnton, während die Systemvariante mit reiner Lenkmomentüberlagerung ohne Warnton im Falle der berechtigten Auslösung die höchste Kontrollierbarkeit erkennen ließ. Bei Falsch-auslösung zeigte sich hauptsächlich die Variante ohne Warnton als problematisch: Mit dieser wurde durchschnittlich der größte Querversatz hergestellt und in zwei Fällen sogar die Fahrstreifengrenze überfahren.

Experiment 4 befasste sich mit situativen Einflüssen auf das Fahrerverhalten und -erleben beim Ausweichen. Getestet wurden zwei unterschiedliche Geschwindigkeiten, mit denen das Hindernis in die Fahrbahn trat, sowie zwei unterschiedliche Abstände, in denen das Hindernis erschien. In einer Fahrstudie mit 64 Probanden wurde untersucht, wie sich Hindernisgeschwindigkeit und Abstand zum Hindernis auf die Reaktion und die Situationsbewertung des Fahrers auswirken. Die Fahrstudie fand als Realfahrt auf dem Testgelände unter Verwendung der Hindernisattrappe CAPLOS statt. Die Fahrer erlebten ein Fahrscenario mit einem plötzlich von der Seite in die Fahrbahn eindringenden Hindernis und wurden dabei von keiner Assistenzfunktion unterstützt. Signifikante mittlere bis hohe Korrelationen zwischen Fahrereinschätzungen und objektiven Messwerten zeigen, dass post-hoc erfragte Fahrerurteile die erlebte Situation differenziert und weitgehend valide und reliabel wiedergeben. Das Fahrererleben und (v.a. das Lenk-) –verhalten scheint dabei stärker von der Hindernisgeschwindigkeit als dem -abstand determiniert.

Aus den Ergebnissen der Nutzerstudien wurden Gestaltungsempfehlungen abgeleitet, die eine nutzergerechte Auslegung von Ausweichassistenz sicherstellen sollen, um sie wirksam und kontrollierbar zu machen:

- Zur Umsetzung einer Ausweichunterstützung wird ein Systemeingriff mittels überlagernder Lenkmomente ohne zusätzliche Komponenten empfohlen. Die ideale Form einer Ausweichunterstützung ist eine adaptive Trajektorienführung. Sind die dafür notwendigen, hohen Anforderungen an die Sensorik nicht erfüllbar, sollte darauf geachtet werden, dass Hilfsmomente nicht zu schnell auf- und abgebaut werden und das vom Fahrer aufgebrauchte Handlenkmoment niemals übersteigen. Das Hilfsmoment sollte möglichst bald nach der Initiierung der Lenkbewegung durch den Fahrer auf- und spätestens bei Reduktion des Lenkwinkels durch den Fahrer wieder abgeschaltet werden.
- Zur Umsetzung einer Ausweichempfehlung wird ein multimodaler Systemeingriff empfohlen. Dabei sollte zum einen ein haptisches oder vestibuläres Signal eingesetzt werden, das dazu in der Lage ist, die gewünschte motorische Reaktion zu bahnen. Die Signale sollten sehr deutlich gestaltet werden, etwaige Lenkeingriffe dürfen sich jedoch nur möglichst wenig auf den Fahrverlauf auswirken. Ausweichempfehlungen eignen sich am besten bei breiten Hindernissen, die sich frontal nähern, auf die Fahrer selten von selbst mit einer Lenkbewegung reagieren.
- Zur Umsetzung einer Ausweichautomatik wird ein multimodaler Systemeingriff empfohlen. Dieser sollte so spät wie möglich erfolgen, dabei jedoch der Tatsache Rechnung tragen, dass der Fahrer den Systemeingriff, gerade in den ersten etwa 300 ms, unter Umständen stark abschwächt. Die Ausweichautomatik sollte von einer automatischen Teilbremsung begleitet

werden. Der Verlauf des Lenkeingriffs sollte möglichst „fließend“ gestaltet werden. Als Rückmeldung über die Aktivität der Ausweichautomatik und als Warnung an den Fahrer sollte der Systemeingriff von einem Warnton und optional auch von einer Anzeige begleitet werden.

Die Arbeit schließt damit, ihre eigenen Grenzen aufzuzeigen und den weiteren Forschungsbedarf darzulegen, der zahlreiche Aspekte umfasst, die im Rahmen der durchgeführten Experimente nicht untersucht wurden. Mit der intensiven Forschung zum autonomen Fahren und den davon zu erwartenden Fortschritten bei der maschinellen Wahrnehmung und Informationsverarbeitung ist davon auszugehen, dass die Realisierung serienmäßiger Ausweichassistenz schnell näher rückt. Ein erster Anfang ist durch Audi Pre Sense Front gemacht, das bereits eine Ausweichunterstützung bietet.

13. Literaturverzeichnis

- Abendroth, B. & Bruder, R. (2015). Die Leistungsfähigkeit des Menschen für die Fahrzeugführung. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz und C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme – Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. (3. überarbeitete und ergänzte Aufl., S. 3-15). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Adams, L.D. (1994). *Review of literature on obstacle avoidance maneuvers: braking versus steering* (report no. UMTRI-94-19). Ann Arbor: ITS Research Center of Excellence.
- Adams, L.D., Flannagan, M.J. & Sivak, M. (1995). *Obstacle avoidance maneuvers in an automobile simulator* (report no. UMTRI-95-3). Ann Arbor: ITS Research Center of Excellence.
- Ammi, M. & Katz, B. (2014). Intermodal audio-haptic metaphor: improvement of target search in abstract environments. *International journal of human-computer interaction*, 30 (11), 921-933.
- Ansorge, U. & Leder, H. (2011). *Wahrnehmung und Aufmerksamkeit*. Wiesbaden: Springer.
- AUDI AG (2016). *Audi pre sense*. Zugriff am 09.10.2017 unter <https://www.audi-technology-portal.de/de/elektrik-elektronik/sicherheitssysteme/audi-pre-sense>
- Baum, H., Kranz, T. & Westerkamp, U. (2011). *Volkswirtschaftliche Kosten durch Straßenverkehrsunfälle in Deutschland*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Mensch und Sicherheit, Heft M 208. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW.
- Bayer, B., Büse, A., Piller, B., Rieth, P., Schmitt, S., Schmittner, B. & Völkel, J. (2009). Mechanische Bremssysteme. In H. Winner, S. Hakuli & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (2. Aufl., S. 271-287). Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- Bender, E. (2008). *Handlungen und Subjektivurteile von Kraftfahrzeugführern bei automatischen Brems- und Lenkeingriffen eines Unterstützungssystems zur Kollisionsvermeidung*. Veröffentlichte Dissertation. Stuttgart: ergonomia.
- Bendixen, A. & Schröger, E. (2017). Auditive Informationsverarbeitung. In J. Müsseler & M. Rieger (Hrsg.), *Allgemeine Psychologie* (3. Aufl., S. 51-74). Berlin: Springer.
- Berg, G. (2014). *Das Vehicle in the Loop - Ein Werkzeug für die Entwicklung und Evaluation von sicherheitskritischen Fahrerassistenzsystemen*. Veröffentlichte Dissertation. Zugriff am 09.10.2017 unter <https://athene-forschung.unibw.de/download/97267/97267.pdf>

- Berg, G. & Färber, Berthold (2015). Vehicle in the Loop. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz und C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme – Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. (3. überarbeitete und ergänzte Aufl., S. 155-163). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Berg, G., Karl, I., & Färber, B. (2011). Vehicle in the Loop - Validierung der virtuellen Welt. *Der Fahrer im 21. Jahrhundert. Fahrer, Fahrerunterstützung und Bedienbarkeit* (S. 143-154). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Beusmanns, J. M. H. (1998). Optic flow and the metric of the visual ground plane. *Vision research*, 38 (8), 1153-1170.
- BGBI. II (1977). *Gesetz zu den Übereinkommen vom 8. November 1968 über den Straßenverkehr und über Straßenverkehrszeichen, zu den Europäischen Zusatzübereinkommen vom 1. Mai 1971 zu diesen Übereinkommen sowie zum Protokoll vom 1. März 1973 über Straßenmarkierungen*. Bundesgesetzblatt, Teil II, Nr. 39. Bonn: Bundesregierung.
- Birbaumer, N. & Schmidt, R. F. (2006). *Biologische Psychologie* (6. Aufl.). Heidelberg: Springer.
- Blaauw, G. J. (1982). Driving experience and task demands in simulator and instrumented car: a validation study. *Human factors*, 24 (4), 473-486.
- Blana, E. (1996). *Driving simulator validation studies: a literature review* (working paper 480). Leeds: Institute of Transport Studies.
- Bock, Th. (2008). *Vehicle in the Loop – Test- und Simulationsumgebung für Fahrerassistenzsysteme*. Veröffentlichte Dissertation. München: Vieweg.
- Bock, Th. (2009). Bewertung von Fahrerassistenzsystemen mittels der Vehicle in the Loop-Simulation. In H. Winner, S. Hakuli & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (2. Aufl., S. 33-42). Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- Bock, Th., Siedersberger, K.-H., Zavrel, M., Brey, A. & Maurer, M. (2005). Simulations- und Testumgebung für Fahrerassistenzsysteme: Vehicle in the Loop. *VDI-Berichte*, 1900, 1-16.
- Bock, Th., Maurer, M. & Färber, G. (2007). Validation of the vehicle in the loop (VIL) – a milestone for the simulation of driver assistance systems. *Proceedings of the 2007 IEEE intelligent vehicles symposium*, doi: 10.1109/IVS.2007.4290183
- Bortz, J. (1977). *Lehrbuch der Statistik für Sozialwissenschaftler*. Berlin: Springer.
- Bortz, J., Lienert, G. & Boehnke, K. (1990). *Verteilungsfreie Methoden in der Biostatistik*. Berlin: Springer.

-
- Bosert, J. (1991). *Quality functional deployment: a practitioner's approach*. New York: ASQC Quality Press.
- Bräuchle, C., Flehmig, F., Rosenstiel, W. & Kropf, T. (2013). Das Fahrerverhalten als Indikator für Fehlauslösungen von aktiven Kollisionsvermeidungsmanövern. *VDI-Berichte*, 2205, 3-14.
- Bubb, H., Bengler, K., Grünen, R.E. & Vollrath, M. (Hrsg.) (2015). *Automobilergonomie*. Wiesbaden: Springer-Vieweg.
- Chiellino, U., Winkle, Th., Graab, B., Ernstberger, A. Donner, E. & Nerlich, M. (2010). Was können Fahrerassistenzsysteme im Unfallgeschehen leisten?. *Zeitschrift für Verkehrssicherheit*, 3 (2010), 131-137.
- Chou, W. & Wang, T. (2001). The design of multimodal human-machine interface for teleoperation. *Proceedings of the IEEE international conference on systems, man and cybernetics*, doi: 10.1109/ICSMC.2001.972009
- Cohen, A. S. (1983). *Einflußgrößen auf das nutzbare Sehfeld* (Bericht zum Forschungsprojekt 8005). Zürich: Bundesanstalt für Straßenwesen.
- Crossland, M. D. (2011). Acuity. In J. C. Besharse & D. Bok (Eds.), *The retina and its disorders*. San Diego: Academic Press.
- Daimler AG (2016). *Aktive Motorhaube*. Zugriff am 09.10.2017 unter http://techcenter.mercedes-benz.com/de_DE/active_hood/detail.html
- Davis, D. R. (1958). Human errors and transport accidents. *Ergonomics*, 2 (1), 24-33.
- Deutscher Verkehrssicherheitsrat (2011). *Der Sicherheitsgurt – Lebensretter Nr. 1*. Schriftenreihe Verkehrssicherheit, Reihe 15. Bonn: Deutscher Verkehrssicherheitsrat.
- Dilich, M. A., Kopernik, D. & Goebelbecker, J. M. (2002). Evaluating driver response to a sudden emergency: issues of expectancy, emotional arousal and uncertainty. *Triodyne safety briefs*, 29 (4), 2-12.
- DIN EN ISO 9241-11:1998-03. *Ergonomic requirements for office work with visual display terminals (VDTs) -- Part 11: guidance on usability* (ISO 9241-11:1998).
- Donges, E. (1982). Aspekte der Aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen. *Automobil-Industrie*, 27 (1982), 183–190.
- Donges, E. (2009). Fahrerverhaltensmodelle. In H. Winner, S. Hakuli & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (2. Aufl., S. 15-23). Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
-

- Dow, B.M. (1974). Functional classes of cells and their laminar distribution in monkey visual cortex. *Journal of neurophysiology*, 37, 927-946.
- Drewing, K. (2017). Multisensorische Informationsverarbeitung. In J. Müsseler & M. Rieger (Hrsg.), *Allgemeine Psychologie* (3. Aufl., S. 75-101). Berlin: Springer.
- Eckert, A., Hartmann, B., Sevenich, M. & Rieth, P. E. (2011). Emergency steer & brake assist – a systematic approach for system integration of two complementary driver assistance systems. *22nd international technical conference on the enhanced safety of vehicles (ESV)*, Washington, DC, 13.06.-16.06.
- Eckstein, L., Schwalm, M. & Zlocki, A. (2015). Methodenbaukasten zur Bewertung der automatisierungsrelevanten Dimensionen der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion. *Fahrerassistenz und Aktive Sicherheit*, Essen, 16.04.-17.04.
- Eicher, C. C. (2012). Todesfalle Landstraße. *ADAC Motorwelt*, Juli 2012, 32-33.
- Egeth, H. E. & Mordkoff, J. T. (1991). Redundancy gain revisited: evidence of parallel processing of color and form. In J. Pomerantz & O. Lockhead (Eds.), *The perception of structure* (pp. 131-143). Washington, DC: American Psychological Association.
- Färber, B. (1986). Abstandswahrnehmung und Bremsverhalten von Kraftfahrern im fließenden Verkehr. *Zeitschrift für Verkehrssicherheit*, 32, 9-13.
- Färber, B. (1987). Geteilte Aufmerksamkeit – Grundlagen und Anwendung im motorisierten Straßenverkehr. In H. Häcker (Hrsg.), *Mensch – Fahrzeug – Umwelt, Band 20*. Köln: TÜV Rheinland.
- Färber, B. (2005). Erhöhter Fahrernutzen durch Integration von Fahrerassistenz- und Fahrerinformationssystemen. In M. Maurer & C. Stiller (Hrsg.), *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung* (S. 140-160). Berlin: Springer.
- Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A.-G. & Buchner, A. (2007). G*Power 3: a flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behavior research methods*, 39, 175-191.
- FEV (2010). Stand: 13.12.2010. *Fahrerlaubnisverordnung – Verordnung über die Zulassung von Personen zum Straßenverkehr*. Zugriff am 09.10.2017 unter https://www.gesetze-im-internet.de/fev_2010/FeV.pdf
- Forster, B., Cavina-Pratesi, C., Aglioti, S. M. & Berlucchi, G. (2002). Redundant target effect and intersensory facilitation from visual-tactile interactions in simple reaction time. *Experimental brain research*, 143 (4), 480-487.

-
- Gail, J., Pöppel-Decker, M., Lorig, M., Eggers, A., Lerner, M. & Ellmers, U. (2008). *Einfluss verbesserter Fahrzeugsicherheit bei Pkw auf die Entwicklung von Landstraßenunfällen*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Fahrzeugtechnik, Heft F 70. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW.
- Gasser, T. M., Seeck, A. & Smith, B. W. (2015). Rahmenbedingungen für die Fahrerassistenzentwicklung. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz und C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme – Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. (3. überarbeitete und ergänzte Aufl., S. 27-54). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Gasser, T. M. & Auerswald, R. (2016). *Vervollständigung der Landkarte der Fahrzeugautomatisierung* (Beitrag zur UR:BAN-Konferenz 02/2016 in Garching). Zugriff am 09.10.2017 unter urban-online.org/cms/upload/download/GASSER.pdf
- Geduld, G. (2009). Lidarsensorik. In: H. Winner, S. Hakuli & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (2. Aufl., S. 172-185). Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- Godley, S. T., Triggs, T. J. & Fildes, B. N. (2002). Driving simulator validation for speed research. *Accident analysis and prevention*, 34, 589-600.
- Grandjean, E. (1979). *Physiologische Arbeitsgestaltung – Leitfaden der Ergonomie* (3. erw. Aufl.). Landsberg: ecomed.
- Hancock, P. A. & de Ridder, S. N. (2003). Behavioural accident avoidance science: understanding response in collision incipient conditions. *Ergonomics*, 46 (12), 1111-1135.
- Hastings, A.C. (2005). Should driver education include training against instinctive human reactions?. In Dorn, L. (Ed.), *Driver behaviour and training, vol. II* (S. 55-60). Aldershot: Ashgate.
- Heesen, M., Dziennus, M., Hesse, T., Schieben, A., Brunken, C., Löper, C., Kelsch, J. & Baumann, M. (2015). Interaction design of automatic steering for collision avoidance: challenges and potentials of driver decoupling. *IET transport systems*, 9 (1), 95-104.
- Hesse, T., Schieben, A., Heesen, M., Dziennus, M., Griesche, S. & Köster, F. (2013). Interaction design for automation initiated steering manoeuvres for collision avoidance, 6. *Tagung Fahrerassistenzsysteme*, Zugriff am 10.10.2017 unter <http://mediatum.ub.tum.de/doc/1187194/1187194.pdf>
- Hoffmann, J. & Gayko, J. (2009). Fahrerwarnelemente. In H. Winner, S. Hakuli & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (2. Aufl., S. 343-355). Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- Holden, R. B. (2010). In L. B. Weiner & W. E. Craighead (Eds.), *The Corsini encyclopedia of psychology* (4th ed., pp. 637-638). Hoboken: Wiley.
-

- Huesmann, A., Farid, M. & Muhrer, E. (2015). Von der Beherrschbarkeit zur Gebrauchssicherheit – Sicherheitsbewertung von Assistenzsystemen. In W. Klaffke (Hrsg.), *Fahrerassistenz und aktive Sicherheit. Wirksamkeit – Beherrschbarkeit – Absicherung* (S. 139-163). Essen: expert.
- Isermann, R., Hohm, A., Mannale, R., Schiele, B., Schmitt, K., Winner, H. & Wojek, C. (2015). Antikollisionssystem PRORETA – Integrierte Lösung zur Vermeidung von Überholunfällen. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz und C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme – Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. (3. überarbeitete und ergänzte Aufl., S. 1093-1100). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- ISO 26262-9:2011-11. *Road vehicles -- functional safety -- Part 9: Automotive safety integrity level (ASIL)-oriented and safety-oriented analyses* (ISO 26262-9:2011).
- Itti, L. & Koch, C. (2001). Computational modelling of visual attention. *Nature reviews neuroscience*, 2 (3), 194-203.
- Johannsen, G. (2006). Fahrzeugführung und Assistenzsysteme. In B. Zimolong & U. Konradt (Hrsg.), *Ingenieurspsychologie. Enzyklopädie der Psychologie, Bd. D-III-22* (S. 737-775). Göttingen: Hogrefe.
- Johansson, G. (1976). Spatio-temporal differentiation and integration in visual motion perception. *Psychological research*, 38, 379-393.
- Johansson, G. (1978). Visual event perception. In R. Held, H. Leibowitz & H.-L. Teuber (Eds.), *Handbook of sensory physiology, vol. VIII: perception* (pp. 675-711). Berlin: Springer.
- Johansson, G., von Hofsten, C. & Jansson, G. (1980). Event perception. *Annual review of psychology*, 31, 27-63.
- Kaptein, N. A., Theeuwes, J. & van der Horst, R. (1996). Driving Simulator Validity: Some Considerations. *Transportation research record*, 1550, 30-36.
- Kastner, M. (1982). Angeborene Verhaltensweisen als Unfallursache bei Ausweichmanövern von Pkw-Fahrern. *VKU Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik*, 19 (1), 7-8.
- Karl, I., Berg, G., Rüger, F. & Färber, B. (2013). Driving behavior and simulator sickness while driving the vehicle in the loop: validation of longitudinal driving behavior. *IEEE intelligent transportation systems magazine*, 5 (1), 42-57.
- Kennedy, R. S., Lane, N. E., Berbaum, K. S. & Lilienthal, M. G. (1993). Simulator sickness questionnaire: an enhanced method for quantifying simulator sickness. *The international journal of aviation psychology*, 3 (3), 203-220.

-
- Kirchner, A., Krüger, K., Mildner, F. & Schmidt, R. (2005). Ein fortgeschrittenes Kollisionsvermeidungssystem. *ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift*, 107 (1), 60-67.
- Klauer, S. G., Dingus, T. A., Neale, V. L., Sudweeks, J. & Ramsey, D.J. (2006). *The impact of driver inattention on near-crash/crash risk: an analysis using the 100-car naturalistic driving study data* (Virginia Tech Transportation Institute, report no. DOT HS 810 594). Zugriff am 09.10.2017 unter <https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/55090/DriverInattention.pdf?sequence=1>
- Kleen, A., & Schmidt, G. (2009). Haptische Ausweichempfehlungen in Kollisionssituationen: Effektivität und Aspekte der Kontrollierbarkeit. *8. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme: Der Mensch im Mittelpunkt technischer Systeme*, Berlin, 07.10.-09.10.
- Knoll, P. (2009). Anzeigen für Fahrerassistenzsysteme. In H. Winner, S. Hakuli & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (2. Aufl., S. 330-342). Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- Kodaka, K., Otabe, M., Urai, Y. & Koike, H. (2003). Rear-end collision velocity reduction system. *SAE technical paper 2003-01-0503*, doi: 10.4271/2003-01-0503.
- König, W. (2009). Nutzergerechte Entwicklung der Mensch-Maschine-Interaktion von Fahrerassistenzsystemen. In H. Winner, S. Hakuli & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (2. Aufl., S. 33-42). Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- Kramer, F. (1998). *Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen. Grundlagen – Komponenten – Systeme* (2. Aufl.). Wiesbaden: Vieweg.
- Kramer, F. (2009). Sicherheitsmaßnahmen. In F. Kramer (Hrsg.), *Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen: Biomechanik – Simulation – Sicherheit im Entwicklungsprozess* (3. Aufl., S. 143-239). Wiesbaden: Vieweg.
- Krems, J. F., Henning, M., & Petzoldt, T. (2009). „Methoden zur Messung von Fahrerverhalten: Vom Labor bis zur Feldstudie“. In H. Winner & R. Bruder (Hrsg.), *Wie realitätsnah lässt sich Fahrerverhalten messen?* (S. 103-111). Stuttgart: ergonomia.
- Kühn, M. & Hannawald, L. (2015). Verkehrssicherheit und Potenziale von Fahrerassistenzsystemen. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz und C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme – Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. (3. überarbeitete und ergänzte Aufl., S. 27-54). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Landis, C. & Hunt, W. A. (1939). *The startle pattern*. New York: Farrar & Rinehart.
- Lechner, D., & Malaterre, G. (1991). Emergency maneuver experimentation using a driving simulator, *SAE paper No. 910016*.
-

- Lehsing, C., Bengler, K., Busch, F. & Schendzielorz, T. (2013). UR:BAN - the German research initiative for user centered driver assistance. *mobil TUM*, München, 18.06.-19.06.
- Limpert, R. & Garnero, F. E. (1974). The accident avoidance potential of the motor vehicle: accident data, vehicle handling and safety standards. *Proceedings of the third international congress on automotive safety*, Washington, DC.
- Malaterre, G., Peytavin, J. F., Jaumier, F., & Kleinmann, A. (1987). L'estimation des manoeuvres realisables en situation d'urgence au volant d'une automobile. *Le travail humain*, 51 (3), 211-227.
- Malaterre, G., Ferrandez, F., Fleury, D. & Lechner, D. (1988). Decision making in emergency situations. *Ergonomics*, 31 (4), 643-655.
- Mann, M. (2008). *Benutzerorientierte Entwicklung und fahrgerechte Auslegung eines Querführungsassistenten*. Veröffentlichte Dissertation. Göttingen: Cuvillier.
- Marascuilo, L. A. & Serlin, R. C. (1988). *Statistical methods for the social and behavioral sciences*. New York: Freeman.
- Mashhour, M. (1964). *Psychophysical relations in the perception of velocity*. Stockholm: Almqvist.
- Mathur, A., Gehrmann, J. & Atchison, D. A. (2013). Pupil shape as viewed along the horizontal visual field. *Journal of vision*, 13 (6), doi: 10.1167/13.6.3
- Maurer, M. (2009). Entwurf und Test von Fahrerassistenzsystemen. In H. Winner, S. Hakuli & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (2. Aufl., S. 43-54). Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- McGehee, D. V., Mazzae, E. N. & Baldwin, G. H. S. (2000). Driver reaction time in crash avoidance research: a validation of a driving simulator study on a test track. *Human factors and ergonomics society annual meeting*, 44 (20), 3-320.
- Meredith, M. A. & Stein, B. E. (1983). Interactions among converging sensory inputs in the superior colliculus. *Science*, 221 (4608), 389-391.
- Meredith, M. A. & Stein, B. E. (1986). Spatial factors determine the activity of multisensory neurons in cat superior colliculus. *Brain research*, 365 (2), 350-354.
- Meredith, M. A., Nemitz, J. W. & Stein, B. E. (1987). Determinants of multisensory integration in superior colliculus neurons - I. Temporal factors. *Journal of neuroscience*, 7 (10), 3215-3229.
- Miller, J. (1982). Divided attention: evidence for coactivation with redundant signals. *Cognitive psychology*, 14, 247-279.

-
- Morawski, J. (2007). Weg-Zeit-Betrachtungen. In W. Hugemann (Hrsg.), *Unfallrekonstruktion* (S. 285-334). Münster: autorenteam.
- Mordkoff, J. T. & Yantis, S. (1991). An interactive race model of divided attention. *Journal of experimental psychology: human perception & performance*, 17, 520-538.
- Mullen, N., Charlton, J., Devlin, A., & Bedard, M. (2011). Simulator validity: behaviors observed on the simulator and on the road. In D. L. Fisher, M. Rizzo, J. K. Caird & J. D. Lee (Eds.), *Handbook of driving simulation for engineering, medicine, and psychology* (pp. 13/1-13/18). Boca Raton: Taylor & Francis Group.
- Müller, C., Sieber, M., Siedersberger, K.-H., Popp, M. & Färber, B. (2017). Aktives Wanken als Kommunikationskanal informierender und warnender Querführungsassistenten. In K. Bengler et al. (Hrsg.), *11. Workshop Fahrerassistenzsysteme und automatisiertes Fahren* (S. 84-93). Darmstadt: Uni-DAS.
- Müller, C., Siedersberger, K.-H., Färber, B. & Popp, M. (2016). Aktive Aufbauneigung als Rückmeldekanal bei Querführungsassistenz über entkoppelte Lenkaktorik. *VDI-Berichte*, 2288, 395-409.
- Müller, H., Krumenacher, J. & Schubert, T. (2015). *Aufmerksamkeit und Handlungssteuerung – Grundlagen für die Anwendung*. Berlin: Springer
- Neukum, A. & Krüger, H.-P. (2003). Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen – Untersuchungsmethoden 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 C. Stiller (Hrsg.), *5. Workshop Fahrerassistenzsysteme* (S. 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 (Hrsg.), *9. Workshop Fahrerassistenzsysteme* (S. 115-125). Darmstadt: Uni-DAS.
- Neukum, A. & Reinelt, W. (2005). Bewertung der Funktionssicherheit aktiver Lenksysteme: ein Human Factors Ansatz. *VDI-Berichte*, 1919, 129-150.
- Neukum, A., Schmidt, E., Westhoff, D., Huesmann, A., Muhrer, E., Schramm, S. & Rüger, F. (2013). *Systematik und Status quo der Methodik* (unveröffentlichter UR:BAN-KON Bericht zum Arbeitspaket 1000). Würzburg: Interdisziplinäres Zentrum für Verkehrswissenschaften.
- Neumann-Cosel, K. von, Dupuis, M., & Weiss, C. (2009). Virtual test drive - provision of a consistent tool-set for [d,h,s,v]-in-the-loop. *Driving Simulator Conference*. Monaco, Frankreich.
-

- Nitsch, V. & Färber, B. (2013). A meta-analysis of the effect of haptic interfaces on task performance with teleoperation systems. *IEEE transactions on haptics*, 6 (4), 387-398.
- Noll, M. & Rapps, P. (2009). Ultraschallsensorik. In H. Winner, S. Hakuli & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (2. Aufl., S. 110-122). Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- NVIS Inc. (2009). *nVisor ST50 Head Mounted Display* (Produktdatenblatt). Zugriff am 22.10.2017 unter https://www.nvisinc.com/product/products.html?layout=detailed_sheet&fid=a0QG0000008qrff-MAQ&fname=nVisor%20ST50
- Posner, M.I., Nissen, M.J. & Ogden, W.C. (1978). Attended and unattended processing modes: the role of set for spatial orienting. *Philosophical transactions of the Royal Society*, B 298, 187-198.
- Proctor, R. W. & Vu, K.-P. L. (2006). *Compatibility principles – data, theory, and application*. Boca Raton: Taylor & Francis Group.
- Purucker, C., Rüger, F., Schneider, N., Neukum A. & Färber, B. (2014). Comparing the perception of critical longitudinal distances between dynamic driving simulation, test track and vehicle in the loop. *Advances in human aspects of transportation. Proceedings of the 5th AHFE Conference*, 421-430.
- Pütz, A., Zlocki, A., & Eckstein, L. (2014). Driver reaction to system initiated evasive manoeuvres. *10th ITS European congress*, Helsinki, Finnland, 16.06.-19.06.
- Quak, M., London, R.E. & Talsma, D. (2015). A multisensory perspective of working memory, *Frontiers in Human Neuroscience*, 9 (197), doi: 10.3389/fnhum.2015.00197
- Rajanen, M. (2003). Usability Cost-Benefit Models – Different Approaches to Usability Benefit Analysis. *Proceedings of 26th information systems research seminar in Scandinavia (IRIS26)*, Haikko, Finland.
- Reimann, G., Brenner, P. & Buring, H. (2009). Lenkstellensysteme. In H. Winner, S. Hakuli & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (2. Aufl., S. 287-312). Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- Remfrey, J., Gruber, S. & Ocvirk, N. (2009). Hydraulische Bremssysteme. In H. Winner, S. Hakuli & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (2. Aufl., S. 250-270). Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- Rockwell, T. (1972). Skills, judgment and information acquisition in driving“. In Forbes, T. W. (Ed.) *Human factors in highway traffic safety research*. New York: John Wiley & Sons.
- Rüger, F., Purucker, C., Schneider, N., Neukum, A. & Färber, B. (2014). Validierung von Engstellenszenarien und Querdynamik im dynamischen Fahrsimulator und Vehicle in the Loop. In B. Färber (Hrsg.), *Workshop Fahrerassistenzsysteme* (S. 137-146). Darmstadt: Uni-DAS.

-
- Rüger, F., Nitsch, V. & Färber, B. (2015). Automatic evasion seen from the opposing traffic – an investigation with the vehicle in the loop. *18th international IEEE conference on intelligent transportation systems (ITSC2015)*, doi: 10.1109/ITSC.2015.173
- Rüger, F., Sieber, M., Siegel, A., Siedersberger, K.-H. & Färber, B. (2015). Fahrerreaktionen auf Eingriffe von Ausweichassistenten-Systemen bei belegtem Gegenfahrstreifen. *8. VDI Fachtagung: Der Fahrer im 21. Jahrhundert*, Braunschweig, 10.11.-11.11.
- Rüger, F. (2016). *Kontrollierbarkeit von Notfall-Fahrerassistenzsystemen in frühen Entwicklungsphasen mit der „VIL-Methode“*. Zugriff am 09.10.2017 unter <https://athene-forschung.unibw.de/download/113352/113352.pdf>
- Sayer, T. B., Sayer, J. R. & Devonshire, J. M. (2005). Assessment of a driver interface for a lateral drift and curve speed warning systems: mixed result for auditory and haptic warnings. In *Proceedings of the 3rd international driving symposium on human factors in driving assessment, training and vehicle design* (pp. 218-224). Iowa City, IA: University of Iowa / Public Policy Center.
- Schittenhelm, H. (2005). Fahrerverhalten und Reaktionszeiten in kritischen Fahrsituationen. *VDI Berichte, 1911*, 1-23.
- Schlag, B., Petermann, I., Weller, G. & Schulze, C. (2009). *Mehr Licht – mehr Sicht – mehr Sicherheit?*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Schlick, C., Bruder, R. & Luczak, H. (2010). *Arbeitswissenschaft*. Berlin: Springer.
- Schmidt, G. (2009). Haptische Signale in der Lenkung: Controllability zusätzlicher Lenkmomente. *Berichte aus dem DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik, Band 7*. Braunschweig: DLR.
- Schmitt, J., Färber, B., Maurer M. & Brey, A. (2006). Menschliches und technisches Verhalten an den Systemgrenzen des FAS. *VDI-Berichte, 1960*, 563-579.
- Schneider, M., Sieber, M. & Färber, B. (2016). CAPLOS. *VEHITS 2016 international conference on vehicle technology and intelligent transport systems*. Rome.
- Schober, H. (1957). *Das Sehen, Bd. I*. Leipzig: VEB Fachbuchverlag.
- Schwabe, L., Wolf, O. T. & Oitzl, M. S. (2010). Memory formation under stress: quantity and quality. *Neuroscience & behavioral reviews, 34* (4), 584-591.
- Schwarz, J. (2006). Response 3 - "Code of Practice" für die Entwicklung, Validierung und Markteinführung von weiterführenden Fahrerassistenzsystemen. *VDI-Berichte, 1960*, 465-472.
-

- Stanczyk, T.L., Lozia, Z., Pieniazek, W. & Jurecki, R.S. (2010). Untersuchung der Fahrerreaktionen auf von rechts anfahrende Fahrzeuge. In *Tagungsband der 19. EVU Jahrestagung* (S. 43-57). Prag, 14.10.-16.10.
- Statistisches Bundesamt (2013). *Verkehr auf einen Blick*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt. Zugriff am 09.10.2017 unter https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/TransportVerkehr/Querschnitt/BroschuereVerkehrBlick0080006139004.pdf?__blob=publicationFile
- Statistisches Bundesamt (2016a). *Transport und Verkehr*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt. Zugriff am 09.10.2017 unter https://www.destatis.de/DE/Publikationen/StatistischesJahrbuch/TransportVerkehr.pdf?__blob=publicationFile
- Statistisches Bundesamt (2016b). *Unfallentwicklung auf deutschen Straßen 2015*. Begleitmaterial zur Pressekonferenz am 12. Juli 2016 in Berlin. Zugriff am 09.10.2017 unter https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressekonferenzen/2016/Unfallentwicklung_2015/Pressebro-schuere_unfallentwicklung.pdf?__blob=publicationFile
- Statistisches Bundesamt (2017). *Verkehr aktuell, Fachserie 8, Reihe 1.1 09/2017*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.
- Stiller, C., Bachmann, A. & Duchow, C. (2009). Maschinelles Sehen. In H. Winner, S. Hakuli & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (2. Aufl., S. 198-222). Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- Spektrum der Wissenschaft (2000a). *Auflösungsvermögen*. Zugriff am 22.10.17 unter <http://www.spektrum.de/lexikon/neurowissenschaft/aufloesungsvermoegen/1071>
- Spektrum der Wissenschaft (2000b). *Schrecklähmung*. Zugriff am 22.10.17 unter <http://www.spektrum.de/lexikon/neurowissenschaft/schrecklaehmung/11476>
- Triggs, T. J. & Harris, W. G. (1982). Reaction time of drivers to road stimuli. *Human factors report no. HFR-12*. Melbourne: Human Factors Group.
- UR:BAN (2013). *Verhaltens- und Intentionserkennung*. Zugriff am 23.10.2017 unter <http://urban-online.org/de/mensch-im-verkehr/verhaltenspraediktion-und-intentionserkennung/index.html>
- van Zanten, A. & Kost, F. (2009). Bremsenbasierte Assistenzfunktionen. In H. Winner, S. Hakuli & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (2. Aufl., S. 356-394). Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- Verein Deutscher Ingenieure (2015). *Positionspapier: Passive Sicherheit. Wie viel passive Fahrzeugsicherheit brauchen wir in Zukunft?*. Zugriff am 09.10.2017 unter https://m.vdi.de/fileadmin/user_upload/VDI-Positionspapier_Passive_Fahrzeugsicherheit.pdf

-
- Victor, T. W., Harbluk, J. L. & Engström, J. A. (2005). Sensitivity of eye-movement measures to in-vehicle task difficulty. *Transportation research Part F*, 8 (2), 167-190.
- Volvo Car Corporation (2017). *Volvo Sicherheitssysteme: vorbildlich seit mehr als acht Jahrzehnten*. Pressemitteilung ID: 44842, 09.07.2012. Zugriff am 10.10.2017 unter <https://www.media.volvocars.com/at/de-at/media/pressreleases/44842>
- Vukotich, A., Popken, M., Rosenow, A. & Lübcke, M. (2008). Driver assistance systems. In *ATZextra worldwide*, 2008 (2), 170-177.
- Weber, D. (2012). *Untersuchung des Potenzials einer Brems-Ausweich-Assistenz*. Veröffentlichte Dissertation. Karlsruhe: Karlsruhe Scientific Publishing.
- Weber, S., Blum, K., Ernstberger, A. & Färber, B. (2015). Standard reactions – driver reactions in critical driving situations. *6th international conference on applied human factors and ergonomics*, 2111-2118, Las Vegas.
- Winner, H. (2009). Radarsensorik. In H. Winner, S. Hakuli & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (2. Aufl., S. 123-171). Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- Winner, H. (2015). Grundlagen von Frontkollisionssystemen. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz und C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme – Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. (3. überarbeitete und ergänzte Aufl., S. 27-54). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Wolkenstein, P. (2005). Der neue Audi Q7. In *ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift*, 11/2005, 967ff.

Anhang

Anhang A: Fragebogen 1.1



VP-Nr.

Datum und Uhrzeit:

*Dieser Fragebogen dient der Erfassung einiger statistischer Angaben.
Bitte füllen Sie ihn vollständig aus (Rückseite beachten).*

1. Ich bin... weiblich männlich
2. Ich bin... rechtshändig linkshändig
2. Mein Alter beträgt... _____ Jahre
3. Beruflich bin ich... _____
4. Den Führerschein besitze ich seit... _____ (Datum)
5. Ich fahre regelmäßig seit... _____ Jahren
6. In den letzten 12 Monaten betrug meine Kilometerleistung... _____ km (ca.)
7. Meine bisherige Gesamtkilometerleistung beträgt... _____ km (ca.)
8. Ich fahre zur Zeit überwiegend... _____
(Pkw-Marke und Modell)

- Bitte wenden -



9. Mit dem Auto fahre ich...
- sehr oft (fast täglich)
 - oft (ca. 2x proWoche)
 - gelegentlich (ca. 3-6x pro Monat)
 - selten (einige Male im Jahr)
 - nie
10. Mit Automatikschaltung fahre ich...
- immer
 - oft
 - gelegentlich
 - selten
 - nie
11. Mit Tempomat fahre ich...
- immer
 - oft
 - gelegentlich
 - selten
 - nie
12. Meine Fahrweise bezeichne ich als...
- sehr sportlich
 - sportlich
 - ausgewogen
 - Komfort betont
 - sehr Komfort betont

*Vielen Dank für das Ausfüllen unseres Fragebogens!
Sie lernen nun das Versuchsfahrzeug kennen.*



Vp-Nr. _____ Bedingung _____ Datum _____

Situationsbewertung

Sie haben gerade eine Situation erlebt, in der ein Vorderfahrzeug plötzlich sehr stark abgebremst hat.

1. Für wie wahrscheinlich halten Sie es, dass in dieser Situation ein Unfall passiert?		
<input type="checkbox"/> ----- <input type="checkbox"/> ----- <input type="checkbox"/> ----- <input type="checkbox"/>		
gar nicht wahrscheinlich	sehr wahrscheinlich	
2. Wie genau haben Sie reagiert, als Sie bemerkt haben, dass das Vorderfahrzeug plötzlich abbremst?		
<input type="checkbox"/> gebremst <input type="checkbox"/> gelenkt <input type="checkbox"/> beides		
3. Wie bewerten Sie im Nachhinein Ihr Bremsverhalten in dieser Situation?		
<input type="checkbox"/> ----- <input type="checkbox"/> ----- <input type="checkbox"/> ----- <input type="checkbox"/>		
viel zu stark gebremst	genau richtig	viel zu schwach gebremst
4. Wie bewerten Sie im Nachhinein Ihr Lenkverhalten in dieser Situation?		
<input type="checkbox"/> ----- <input type="checkbox"/> ----- <input type="checkbox"/> ----- <input type="checkbox"/>		
viel zu stark gelenkt	genau richtig	viel zu schwach gelenkt

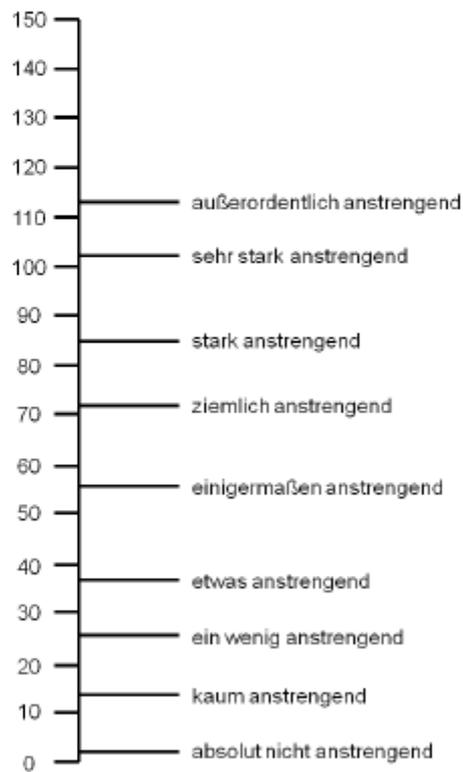
Bitte umblättern ...



5. Wie anstrengend haben Sie diese Situation empfunden?

Bitte machen Sie an der Stelle der Skala einen Strich, die Ihrer Meinung nach Ihrer Anstrengung während dem plötzlichen Bremsmanöver des Vorderfahrzeugs entsprach. Sie können diesen Strich dabei an jeder beliebigen Stelle machen, die sprachlichen Angaben und die Zahlen dienen lediglich als Orientierungshilfe.

Die Situation, während der das Vorderfahrzeug plötzlich gebremst hat, empfand ich als ...





VP-Nr.

Datum und Uhrzeit:

*Sie sind mehrmals gefährlichem Querverkehr ausgewichen: Real und virtuell.
Bitte bewerten Sie diese Situationen in Bezug auf die folgenden Fragen.*

1. In welcher Situation haben Sie das seitlich kommende Fahrzeug früher bemerkt?
real virtuell

2. In welcher Situation haben Sie auf das seitlich kommende Fahrzeug besser reagiert?
real virtuell

3. Welche Situation haben Sie als schwieriger zu meistern erlebt?
real virtuell

4. Welche Situation haben Sie als bedrohlicher erlebt?
real virtuell

Vielen Dank!

Anhang D: Fragebogen 1.4



VP-Nr.

Datum und Uhrzeit:

*Das Fahrzeug hat die Lenkbewegungen verstärkt.
Bitte beurteilen Sie den Lenkeingriff auf den folgenden Skalen.*

1. Fahrt: Die Lenkunterstützung...

...ist angenehm ○-----○-----○-----○-----○ ...ist unangenehm

...ist störend ○-----○-----○-----○-----○ ...ist hilfreich

...ist nutzlos ○-----○-----○-----○-----○ ...ist nützlich

...ist deutlich zu spüren ○-----○-----○-----○-----○ ...ist nicht zu spüren

...erhöht den Fahrspaß ○-----○-----○-----○-----○ ...verringert den Fahrspaß

...leicht zu übersteuern ○-----○-----○-----○-----○ ...schwer zu übersteuern

...verringert den Fahrkomfort ○-----○-----○-----○-----○ ...erhöht den Fahrkomfort

...ist befreiend ○-----○-----○-----○-----○ ...ist gängelnd

...ist beanspruchend ○-----○-----○-----○-----○ ...ist entlastend

...unterstützt mich ○-----○-----○-----○-----○ ...behindert mich

...erhöht die Sicherheit ○-----○-----○-----○-----○ ...verringert die Sicherheit



VP-Nr.

Datum und Uhrzeit:

*Das Fahrzeug hat die Lenkbewegungen verstärkt.
Bitte beurteilen Sie den Lenkeingriff auf den folgenden Skalen.*

3. Fahrt: Die Lenkunterstützung...

...ist angenehm ...ist unangenehm

...ist störend ...ist hilfreich

...ist nutzlos ...ist nützlich

...ist deutlich zu spüren ...ist nicht zu spüren

...erhöht den Fahrspaß ...verringert den Fahrspaß

...leicht zu übersteuern ...schwer zu übersteuern

...verringert den Fahrkomfort ...erhöht den Fahrkomfort

...ist befreiend ...ist gängelnd

...ist beanspruchend ...ist entlastend

...unterstützt mich ...behindert mich

...erhöht die Sicherheit ...verringert die Sicherheit



VP-Nr.

Datum und Uhrzeit:

*Das Fahrzeug hat die Lenkbewegungen verstärkt.
Bitte beurteilen Sie den Lenkeingriff auf den folgenden Skalen.*

5. Fahrt: Die Lenkunterstützung...

...ist angenehm ...ist unangenehm

...ist störend ...ist hilfreich

...ist nutzlos ...ist nützlich

...ist deutlich zu spüren ...ist nicht zu spüren

...erhöht den Fahrspaß ...verringert den Fahrspaß

...leicht zu übersteuern ...schwer zu übersteuern

...verringert den Fahrkomfort ...erhöht den Fahrkomfort

...ist befreiend ...ist gängelnd

...ist beanspruchend ...ist entlastend

...unterstützt mich ...behindert mich

...erhöht die Sicherheit ...verringert die Sicherheit



VP-Nr.

Datum und Uhrzeit:

*Das Fahrzeug hat die Ausweichmanöver unterschiedlich unterstützt.
Bitte vergleichen Sie die zwei zuletzt gefahrenen Ausweichmanöver.*

1.	Das Lenken fiel mir leichter bei der...	<input type="radio"/> 1. Fahrt	<input type="radio"/> 2. Fahrt
2.	Deutlicher gespürt habe ich den Lenkeingriff bei der...	<input type="radio"/> 1. Fahrt	<input type="radio"/> 2. Fahrt
3.	Die Stärke der Lenkunterstützung fand ich angemessener bei der...	<input type="radio"/> 1. Fahrt	<input type="radio"/> 2. Fahrt
4.	Das Verhalten der Lenkunterstützung war besser zu verstehen bei der...	<input type="radio"/> 1. Fahrt	<input type="radio"/> 2. Fahrt
5.	Zufriedener mit dem Ausweichmanöver war ich bei der...	<input type="radio"/> 1. Fahrt	<input type="radio"/> 2. Fahrt
6.	Sicherer fühlte ich mich bei der...	<input type="radio"/> 1. Fahrt	<input type="radio"/> 2. Fahrt
7.	Hilfreicher fand ich die Lenkunterstützung bei der...	<input type="radio"/> 1. Fahrt	<input type="radio"/> 2. Fahrt
8.	Die Lenkunterstützung empfand ich als angenehmer bei der...	<input type="radio"/> 1. Fahrt	<input type="radio"/> 2. Fahrt
9.	Insgesamt besser fand ich die Lenkunterstützung bei der...	<input type="radio"/> 1. Fahrt	<input type="radio"/> 2. Fahrt
10.	Eher benutzen würde ich die Lenkunterstützung der...	<input type="radio"/> 1. Fahrt	<input type="radio"/> 2. Fahrt



VP-Nr.

Datum und Uhrzeit:

*Das Fahrzeug hat die Ausweichmanöver unterschiedlich unterstützt.
Bitte vergleichen Sie die zwei zuletzt gefahrenen Ausweichmanöver.*

1.	Das Lenken fiel mir leichter bei der...	<input type="radio"/> 3. Fahrt	<input type="radio"/> 4. Fahrt
2.	Deutlicher gespürt habe ich den Lenkeingriff bei der...	<input type="radio"/> 3. Fahrt	<input type="radio"/> 4. Fahrt
3.	Die Stärke der Lenkunterstützung fand ich angemessener bei der...	<input type="radio"/> 3. Fahrt	<input type="radio"/> 4. Fahrt
4.	Das Verhalten der Lenkunterstützung war besser zu verstehen bei der...	<input type="radio"/> 3. Fahrt	<input type="radio"/> 4. Fahrt
5.	Zufriedener mit dem Ausweichmanöver war ich bei der...	<input type="radio"/> 3. Fahrt	<input type="radio"/> 4. Fahrt
6.	Sicherer fühlte ich mich bei der...	<input type="radio"/> 3. Fahrt	<input type="radio"/> 4. Fahrt
7.	Hilfreicher fand ich die Lenkunterstützung bei der...	<input type="radio"/> 3. Fahrt	<input type="radio"/> 4. Fahrt
8.	Die Lenkunterstützung empfand ich als angenehmer bei der...	<input type="radio"/> 3. Fahrt	<input type="radio"/> 4. Fahrt
9.	Insgesamt besser fand ich die Lenkunterstützung bei der...	<input type="radio"/> 3. Fahrt	<input type="radio"/> 4. Fahrt
10.	Eher benutzen würde ich die Lenkunterstützung der...	<input type="radio"/> 3. Fahrt	<input type="radio"/> 4. Fahrt



VP-Nr.

Datum und Uhrzeit:

*Das Fahrzeug hat die Ausweichmanöver unterschiedlich unterstützt.
Bitte vergleichen Sie die zwei zuletzt gefahrenen Ausweichmanöver.*

1.	Das Lenken fiel mir leichter bei der...	<input type="radio"/> 5. Fahrt	<input type="radio"/> 6. Fahrt
2.	Deutlicher gespürt habe ich den Lenkeingriff bei der...	<input type="radio"/> 5. Fahrt	<input type="radio"/> 6. Fahrt
3.	Die Stärke der Lenkunterstützung fand ich angemessener bei der...	<input type="radio"/> 5. Fahrt	<input type="radio"/> 6. Fahrt
4.	Das Verhalten der Lenkunterstützung war besser zu verstehen bei der...	<input type="radio"/> 5. Fahrt	<input type="radio"/> 6. Fahrt
5.	Zufriedener mit dem Ausweichmanöver war ich bei der...	<input type="radio"/> 5. Fahrt	<input type="radio"/> 6. Fahrt
6.	Sicherer fühlte ich mich bei der...	<input type="radio"/> 5. Fahrt	<input type="radio"/> 6. Fahrt
7.	Hilfreicher fand ich die Lenkunterstützung bei der...	<input type="radio"/> 5. Fahrt	<input type="radio"/> 6. Fahrt
8.	Die Lenkunterstützung empfand ich als angenehmer bei der...	<input type="radio"/> 5. Fahrt	<input type="radio"/> 6. Fahrt
9.	Insgesamt besser fand ich die Lenkunterstützung bei der...	<input type="radio"/> 5. Fahrt	<input type="radio"/> 6. Fahrt
10.	Eher benutzen würde ich die Lenkunterstützung der...	<input type="radio"/> 5. Fahrt	<input type="radio"/> 6. Fahrt

Anhang F: Fragebogen 1.6



VP-Nr.

Datum und Uhrzeit:

Sie haben eine Falschauslösung des Systems erlebt.

Bitte beurteilen Sie die Schwere der Beeinträchtigung durch den Systemfehler.

10	unkontrollierbar	Fahrzeug war nicht mehr kontrollierbar
9	gefährlich	Kompensatorischer Aufwand um Fahrzeug in der Spur zu halten war groß und nicht tolerierbar
8		
7		
6	störend	deutlicher, aber vertretbarer kompensatorischer Aufwand war erforderlich, um das Fahrzeug in der Spur zu halten
5		
4		
3	spürbar	Störung bemerkt, hatte aber keinen oder nur geringen Einfluss auf die Fahraufgabe
2		
1		
0	nichts spürbar	nichts bemerkt

Vielen Dank!



VP-Nr. _____ Datum, Uhrzeit: _____

*Dieser Fragebogen dient der Erfassung ihrer Fahrerfahrung und -gewohnheiten.
Bitte füllen Sie ihn vollständig aus und beachten Sie auch die Rückseite.*

1. Ich bin... weiblich männlich
2. Ich bin... rechtshändig linkshändig
2. Mein Alter beträgt... _____ Jahre
3. Mein Beruf ist... _____
4. Den Führerschein besitze ich seit... _____ (Datum)
5. Ich fahre regelmäßig seit... _____ Jahren
6. In den letzten 12 Monaten betrug meine Kilometerleistung... _____ km (ca.)
7. Meine bisherige Gesamtkilometerleistung beträgt... _____ km (ca.)
8. Ich fahre zur Zeit überwiegend... _____
(Pkw-Marke und Modell)
9. Mit dem Auto fahre ich...
 sehr oft (fast täglich)
 oft (ca. 2x wöchentlich)
 gelegentlich (ca. 3-6x monatlich)
 selten (einige Male jährlich)
 nie

- Bitte wenden -



10. Mit Automatikgetriebe fahre ich...
 (fast) immer
 oft
 gelegentlich
 selten
 nie
11. Erfahrung mit ACC (Adaptive Cruise Control) habe ich...
 viel
 kaum
 keine
12. Erfahrung mit Spurverlassenswarnern habe ich...
 viel
 kaum
 keine
13. Erfahrung mit Spurhalteassistenten habe ich...
 viel
 kaum
 keine
14. Erfahrung mit ESP (Fahrodynamikregelung) habe ich...
 viel
 kaum
 keine
15. Erfahrung mit ABS (Antiblockiersystem) habe ich...
 viel
 kaum
 keine
12. Meine Fahrweise bezeichne ich als...
 sehr sportlich
 sportlich
 ausgewogen
 Komfort betont
 sehr Komfort betont
13. Im Linksverkehr gefahren bin ich...
 noch nie
 ein einziges Mal
 mehrere Male
 bereits mehrere Wochen
 bereits mehrere Monate

*Vielen Dank für das Ausfüllen unseres Fragebogens!
 Sie lernen nun das Versuchsfahrzeug kennen.*



VP-Nr. _____

Datum, Uhrzeit: _____

Sie haben eine kritische Verkehrssituation erlebt. Dabei hat ein quer zur Fahrbahn stehendes Fahrzeug die Vorfahrt missachtet und Ihnen teilweise den Weg blockiert.

1. Wie kritisch war die Situation?

nicht kontrollierbar	10
gefährlich	9
	8
	7
unangenehm	6
	5
	4
harmlos	3
	2
	1
nichts bemerkt	0

1. Wie wollten Sie reagieren, als das Hindernis plötzlich erschien?

- Ich wollte das Hindernis ungebremst umfahren.
- Ich wollte vor dem Hindernis in den Stillstand bremsen.
- Ich wollte die Geschwindigkeit mindern und das Hindernis umfahren.

2. Wie hat Ihr Fahrzeug reagiert, als das Hindernis plötzlich erschien?

1 |



3. Hat die Fahrzeugreaktion Ihre Entscheidung beeinflusst?

Ja, auf folgende Weise:

Nein.

Kann ich nicht beurteilen.

4. Wie beurteilen Sie den Warn-/Eingriffszeitpunkt?

zu früh zu spät



VP-Nr. _____

Datum, Uhrzeit: _____

Während der kritischen Verkehrssituation wurde in die Windschutzscheibe eine optische Anzeige eingeblendet.

Wann haben Sie die Anzeige bemerkt?

- Überhaupt nicht.
- Kurz nachdem ich das Hindernis entdeckt hatte.
- Kurz bevor ich das Hindernis entdeckt hatte.

Wie sah die Anzeige aus?

Welche Bedeutung hat die Anzeige Ihrer Meinung nach?

Bitte beurteilen Sie die Anzeige:

- | | | | | | | |
|--------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|
| behindernd | <input type="radio"/> | unterstützend |
| gut sichtbar | <input type="radio"/> | schlecht sichtbar |
| verwirrend | <input type="radio"/> | gut verständlich |
| ungeeignet | <input type="radio"/> | gut geeignet |
| effektiv | <input type="radio"/> | ineffektiv |

Was würden Sie an der Anzeige ändern?

3 |



VP-Nr. _____ Datum, Uhrzeit: _____

Während der kritischen Verkehrssituation hat das Fahrzeug selbstständig in die Lenkung eingegriffen.

Wann haben Sie den Lenkeingriff bemerkt?

Überhaupt nicht.

Kurz nachdem ich das Hindernis entdeckt hatte.

Kurz bevor ich das Hindernis entdeckt hatte.

Wie wirkte sich der Lenkeingriff aus?

Welche Bedeutung hatte der Lenkeingriff Ihrer Meinung nach?

Bitte beurteilen Sie den Lenkeingriff:

behindernd	<input type="radio"/>	unterstützend				
gut spürbar	<input type="radio"/>	schlecht spürbar				
verwirrend	<input type="radio"/>	gut verständlich				
ungeeignet	<input type="radio"/>	gut geeignet				
effektiv	<input type="radio"/>	ineffektiv				

Was würden Sie am Lenkeingriff ändern?



VP-Nr. _____

Datum, Uhrzeit: _____

Sie haben eine Falschauslösung des Systems erlebt.

Wie stark beeinträchtigte der Systemfehler Ihre Fahraufgabe?

10	unkontrollierbar	Fahrzeug war nicht mehr kontrollierbar
9	gefährlich	Kompensatorischer Aufwand, um Fahrzeug in der Spur zu halten, war groß und nicht tolerierbar
8		
7		
6	störend	deutlicher, aber vertretbarer kompensatorischer Aufwand war erforderlich, um das Fahrzeug in der Spur zu halten
5		
4		
3	spürbar	Störung bemerkt, hatte aber keinen oder nur geringen Einfluss auf die Fahraufgabe
2		
1		
0	nichts spürbar	nichts bemerkt

Bitte beurteilen Sie den Systemfehler auch bezüglich folgender Eigenschaften:

nicht irritierend irritierend

sicherheitskritisch sicherheitsunkritisch

Würden Sie das System trotz unerwünschter Auslösungen akzeptieren?

überhaupt nicht akzeptabel voll akzeptabel

Vielen Dank!

Anhang J: Fragebogen 3.1



VP-Nr. _____ Datum, Uhrzeit: _____

*Dieser Fragebogen dient der Erfassung ihrer Fahrerfahrung und -gewohnheiten.
Bitte füllen Sie ihn vollständig aus und beachten Sie auch die Rückseite.*

1. Ich bin... weiblich männlich
2. Ich bin... rechtshändig linkshändig
2. Mein Alter beträgt... _____ Jahre
3. Mein Beruf ist... _____
4. Den Führerschein besitze ich seit... _____ (Datum)
5. Ich fahre regelmäßig seit... _____ Jahren
6. In den letzten 12 Monaten betrug meine Kilometerleistung... _____ km (ca.)
7. Meine bisherige Gesamtkilometerleistung beträgt... _____ km (ca.)
8. Ich fahre zur Zeit überwiegend... _____
(Pkw-Marke und Modell)
9. Mit dem Auto fahre ich...
 sehr oft (fast täglich)
 oft (ca. 2x wöchentlich)
 gelegentlich (ca. 3-6x monatlich)
 selten (einige Male jährlich)
 nie

- Bitte wenden -



10. Mit Automatikgetriebe fahre ich...
 (fast) immer
 oft
 gelegentlich
 selten
 nie
15. Erfahrung mit ABS (Antiblockiersystem) habe ich...
 viel
 kaum
 keine
12. Erfahrung mit ESP (Fahr-dynamikregelung) habe ich...
 viel
 kaum
 keine
13. Erfahrung mit Spurverlassenswarnern habe ich...
 viel
 kaum
 keine
14. Erfahrung mit Spurhalteassistenten habe ich...
 viel
 kaum
 keine
15. Erfahrung mit ACC (Adaptive Cruise Control) habe ich...
 viel
 kaum
 keine
12. Meine Fahrweise bezeichne ich als...
 sehr sportlich
 sportlich
 ausgewogen
 Komfort betont
 sehr Komfort betont

*Vielen Dank für das Ausfüllen unseres Fragebogens!
Sie lernen nun das Versuchsfahrzeug kennen.*

Anhang K: Fragebogen 3.2



VP-Nr. _____

Datum, Uhrzeit: _____

Ein quer zur Fahrbahn stehendes Fahrzeug hat die Vorfahrt missachtet und Ihnen teilweise den Weg blockiert.

Wie kritisch war die Situation?

nicht kontrollierbar	10
gefährlich	9
	8
unangenehm	7
	6
harmlos	5
	4
nichts bemerkt	3
	2
	1
	0

Wie wollten Sie reagieren, als das Hindernis plötzlich erschien?

- Ich wollte dem Hindernis ungebremst ausweichen.
- Ich wollte vor dem Hindernis in den Stillstand bremsen.
- Ich wollte die Geschwindigkeit mindern und dem Hindernis ausweichen.

Wie hat Ihr Fahrzeug reagiert, als das Hindernis plötzlich erschien?



Hat die Fahrzeugreaktion Ihre Entscheidung beeinflusst?

Ja, auf folgende Weise:

Nein.

Kann ich nicht beurteilen.

Wie beurteilen Sie den Warn-/Eingriffszeitpunkt?

zu früh zu spät

Würden Sie ein System wie das eben erlebte in Ihrem PKW akzeptieren?

überhaupt nicht
akzeptabel voll akzeptabel



VP-Nr.

Datum, Uhrzeit:

Während der kritischen Verkehrssituation wurde in die Windschutzscheibe eine optische Anzeige eingeblendet.

Wann haben Sie die Anzeige bemerkt?

- Überhaupt nicht.
- Kurz nachdem ich das Hindernis entdeckt hatte.
- Kurz bevor ich das Hindernis entdeckt hatte.

Wie sah die Anzeige aus?

Welche Bedeutung hat die Anzeige Ihrer Meinung nach?

Bitte beurteilen Sie die Anzeige:

- | | | | | | | |
|--------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|
| behindernd | <input type="radio"/> | unterstützend |
| gut sichtbar | <input type="radio"/> | schlecht sichtbar |
| verwirrend | <input type="radio"/> | gut verständlich |
| ungeeignet | <input type="radio"/> | gut geeignet |
| effektiv | <input type="radio"/> | ineffektiv |



VP-Nr.

Datum, Uhrzeit:

Während der kritischen Verkehrssituation wurde über die Lautsprecher ein akustisches Signal ausgegeben.

Wann haben Sie den Signalton bemerkt?

- Überhaupt nicht.
- Kurz nachdem ich das Hindernis entdeckt hatte.
- Kurz bevor ich das Hindernis entdeckt hatte.

Welche Bedeutung hat der Signalton Ihrer Meinung nach?

Bitte beurteilen Sie das Signal:

- | | | | | | | |
|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|
| behindernd | <input type="radio"/> | unterstützend |
| gut hörbar | <input type="radio"/> | schlecht hörbar |
| verwirrend | <input type="radio"/> | gut verständlich |
| ungeeignet | <input type="radio"/> | gut geeignet |
| effektiv | <input type="radio"/> | ineffektiv |



VP-Nr. _____ Datum, Uhrzeit: _____

Während der kritischen Verkehrssituation hat das Fahrzeug selbstständig in die Lenkung eingegriffen.

Wann haben Sie den Lenkeingriff bemerkt?

Überhaupt nicht.

Kurz nachdem ich das Hindernis entdeckt hatte.

Kurz bevor ich das Hindernis entdeckt hatte.

Welche Bedeutung hatte der Lenkeingriff Ihrer Meinung nach?

Bitte beurteilen Sie den Lenkeingriff:

- behindernd unterstützend
- gut spürbar schlecht spürbar
- verwirrend gut verständlich
- ungeeignet gut geeignet
- effektiv ineffektiv

Was würden Sie am Lenkeingriff ändern?



VP-Nr. _____

Datum, Uhrzeit: _____

Sie haben eine Falschauslösung des Systems erlebt.

Wie stark beeinträchtigte der Systemfehler Ihre Fahraufgabe?

10	unkontrollierbar	Fahrzeug war nicht mehr kontrollierbar
9	gefährlich	Kompensatorischer Aufwand, um Fahrzeug in der Spur zu halten, war groß und nicht tolerierbar
8		
7		
6	störend	deutlicher, aber vertretbarer kompensatorischer Aufwand war erforderlich, um das Fahrzeug in der Spur zu halten
5		
4		
3	spürbar	Störung bemerkt, hatte aber keinen oder nur geringen Einfluss auf die Fahraufgabe
2		
1		
0	nichts spürbar	nichts bemerkt

Bitte beurteilen Sie den Systemfehler auch bezüglich folgender Eigenschaften:

nicht irritierend irritierend

sicherheitskritisch sicherheitsunkritisch

Würden Sie das System trotz unerwünschter Auslösungen akzeptieren?

überhaupt nicht akzeptabel voll akzeptabel

Vielen Dank!

Anhang M: Fragebogen 4.1



VP-Nr. _____

Datum, Uhrzeit: _____

*Dieser Fragebogen dient der Erfassung ihrer Fahrerfahrung und -gewohnheiten.
Bitte füllen Sie ihn vollständig aus und beachten Sie auch die Rückseite.*

1. Ich bin... weiblich männlich
2. Ich bin... rechtshändig linkshändig
2. Mein Alter beträgt... _____ Jahre
3. Mein Beruf ist... _____
4. Den Führerschein besitze ich seit... _____ (Datum)
5. Ich fahre regelmäßig seit... _____ Jahren
6. In den letzten 12 Monaten betrug meine Kilometerleistung... _____ km (ca.)
7. Meine bisherige Gesamtkilometerleistung beträgt... _____ km (ca.)
8. Ich fahre zur Zeit überwiegend... _____
(Pkw-Marke und Modell)
 sehr oft (öfter als 5x wöchentlich)
 oft (öfter als 1x wöchentlich)
 gelegentlich (öfter als 1x monatl.)
 selten (öfter als 1x jährlich)
 nie
9. Ich fahre (Pkw)...

- Bitte wenden -



10. Mit Automatikgetriebe fahre ich...
- (fast) immer
 - oft
 - gelegentlich
 - selten
 - nie
11. Meine Fahrweise bezeichne ich als...
- sehr sportlich
 - sportlich
 - ausgewogen
 - Komfort betont
 - sehr Komfort betont

*Vielen Dank für das Ausfüllen unseres Fragebogens!
Sie lernen nun das Versuchsfahrzeug kennen.*

Anhang N: Fragebogen 4.2



VP-Nr. _____

Datum, Uhrzeit: _____

Ein quer zur Fahrbahn stehendes Fahrzeug hat die Vorfahrt missachtet und Ihnen teilweise den Weg blockiert.

Wie kritisch war die Situation?

nicht kontrollierbar	10
gefährlich	9
	8
unangenehm	7
	6
harmlos	5
	4
nichts bemerkt	3
	2
	1
	0

-bitte wenden-

1 |

