

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

Kontrollierbarkeit von Notfall-Fahrerassistenz- systemen in frühen Entwicklungsphasen mit der „VIL-Methode“

Fabian Rüger, M.Sc.

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

Doktor- Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation

1. Berichterstatter: Univ.-Prof'in Dr.-Ing- Barbara Deml
 2. Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr. Berthold Färber
- Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Alexander Lion

Diese Dissertation wurde am 02.03.2016 bei der Universität der Bundeswehr München,
85579 Neubiberg eingereicht und durch die Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik am
09.03.2016 angenommen. Die mündliche Prüfung fand am 10.06.2016 statt.

Kurzfassung

Vor dem Hintergrund der Zunahme des Individualverkehrs im urbanen Raum werden in Forschungsinitiativen wie UR:BAN (Lehsing et al. 2013) neue Systeme der aktiven Sicherheit zur Senkung der Unfallzahlen in Ortschaften entwickelt. Diese Fahrerassistenzsysteme beinhalten potentielle Eingriffe in die Längs- und Querführung, um Hindernissen auszuweichen, wenn eine Kollision alleine durch Bremsen nicht mehr zu vermeiden wäre (vgl. Winner 2015). Im Rahmen der Absicherung dieser Systeme müssen bereits in frühen Phasen des Entwicklungsprozesses Fragen der Kontrollierbarkeit evaluiert werden (vgl. ISO 26262 2011). Speziell Systeme der aktiven Sicherheit erfordern valide Testmethoden für belastbare Aussagen über deren Beherrschbarkeit (Breuer 2012). Die Entwicklung solcher Prüfmethoden und deren Verifikation soll parallel zur Entwicklung der eigentlichen Assistenzfunktionen stattfinden (RESPONSE Consortium 2009).

In der vorliegenden Arbeit wird eine solche Methodik für die Kontrollierbarkeitsprüfung der in UR:BAN entwickelten Ausweichfunktionen vorgestellt. Die "VIL-Methode" nutzt als Grundlage die gleichnamige Prüfumgebung: das Vehicle in the Loop (VIL). In einem ersten Schritt wurde dieser Hybrid aus Realfahrzeug und Sichtsimation in generischen Manövern mit realen Fahrten auf einer Teststrecke verglichen und der Nachweis erbracht, dass das VIL in den untersuchten Fällen reales Fahrerverhalten abbildet. Auf dieser Basis wurden anschließend mehrere Testfälle zur Beantwortung von Kontrollierbarkeitsfragestellungen bei Ausweichassistenzsystemen exemplarisch im VIL untersucht. Zum einen wurden Eingriffe von Ausweichsystemen aus Gegenverkehrsperspektive evaluiert. Es zeigte sich, dass aufmerksame Fahrer durch geeignete Gegenmaßnahmen solche Eingriffe in entgegenkommenden Fahrzeugen entschärfen können. Die ermittelte Grenze, ab der die Fahrerleistungen dafür nicht mehr ausreichen, stellt gleichzeitig ein funktionales Limit für die Auslösung von Ausweichsystemen dar. Zum anderen wurden Eingriffe von Ausweichfunktionen im VIL untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass Fahrer zu starke Eingriffe situationsadäquat dämpfen können, um einerseits eine Kollision mit dem Hindernis zu vermeiden, andererseits den eigenen Fahrstreifen bei belegtem Gegenfahrstreifen nicht zu verlassen. Ein Abgleich der untersuchten Situationen mit etablierten Verfahren auf der Teststrecke konnte die Reliabilität der Ergebnisse im VIL bestätigen und die Methode verifizieren.

Abstract

With a rising amount of individual traffic in urban areas the development of active safety systems, aiming to reduce accidents in cities is subject to current research initiatives such as UR:BAN (Lehsing et al. 2013). These advanced driver assistance systems (ADAS) potentially intervene in the longitudinal or lateral control of vehicles to evade obstacles even if it is too late to brake to a standstill (e.g. Winner 2015). In order to ensure safe usage of those systems, aspects of system controllability have to be evaluated in early stages of the system development process (e.g. ISO 26262 2011). Especially active safety systems require valid testing methods for obtaining well-founded evidence (Breuer 2012). The development of such testing methods and their verification should be done in parallel to the development process of the assistance functions themselves (RESPONSE Consortium 2009).

In the present work, a methodology for the controllability assessment of automatic evasion systems is presented. The so-called “VIL-Method” uses the testing environment “Vehicle in the Loop (VIL)”, a driving simulator that is operated in a car on a test track. In a first step, driving behavior in the VIL was compared with the behavior that drivers display with the test track vehicle in a number of generic maneuvers. The results showed that the VIL is a valid test method for the investigated situations. Subsequently, exemplary controllability assessments with the VIL were performed. For one, interventions of automatic evasion systems were investigated from the perspective of on-coming vehicles. The results showed that attentive drivers are able to counteract interventions of automatic evasion systems in on-coming vehicles adequately to avoid an accident in the investigated situations. The measured performance limits of the drivers set the limits for the functional design. Furthermore, interventions of automatic evasion systems were examined in the VIL. It was shown that drivers can mitigate drastic interventions according to the driving situation. Drivers were able to avoid a collision with an obstacle and stay in their lane when the opposing lane was occupied. Comparing the investigated situations with well-established methods on the test track, the reliability of the results and the VIL-Method itself could be verified.

Vorwort

Diese Dissertation entstand in meiner vierjährigen Zeit am Institut für Arbeitswissenschaft der Universität der Bundeswehr München. Ich möchte mich an dieser Stelle bei allen bedanken, die meinen Weg begleitet und zum Gelingen beigetragen haben.

An erster Stelle danke ich Herrn Prof. Dr. Berthold Färber, der als mein Doktorvater und ständiger Diskussionspartner die Arbeit ermöglicht, vorangetrieben und ihr zum Abschluss verholfen hat. Mein Dank gilt auch dem Vorsitzenden des Promotionsausschusses Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Alexander Lion und der Berichterstatterin Frau Prof. Dr.-Ing. Barbara Deml.

Einen besonderen Dank hat Frau Jun.-Prof. Dr.-Ing. Verena Nitsch verdient, die mir fachlich und menschlich immer zur Seite stand und damit einen wesentlichen Anteil an dieser Promotionsarbeit hat. Meinen Masterarbeits-Betreuern Dr.-Ing. Guy Berg und Ines Karl danke ich dafür, dass sie mich zum experimentellen Arbeiten verführt und damit letztendlich die Arbeit angestoßen haben.

Ich hatte die besondere Freude während meiner Promotion im Förderprojekt UR:BAN arbeiten zu dürfen. Ich danke dem KON-Team und allen voran der Leiterin Alexandra Neukum sowie Dr. Christian Purucker und Norbert Schneider für die wunderbare Zusammenarbeit und die gemeinsamen Studien. Die eine oder andere Studie wäre auch ohne technische Unterstützung nicht möglich gewesen. Deshalb danke ich Dr.-Ing. Karl-Heinz Siedersberger, Andreas Siegel und dem Team vom Projekthaus Fahrerassistenzsysteme, dass sie unserem Versuchsträger das „Ausweichen“ beigebracht haben.

Der größte Dank gilt meiner Familie und meinen Freunden, die mich während der gesamten Zeit unterstützt, entbehrt und ertragen haben. Ich habe das große Glück mit Eltern beschenkt zu sein, die ihr letztes Hemd geben würden, um ihren Kindern alles zu ermöglichen und hoffe Sie mit ein wenig Stolz zu erfüllen. Diese Doktorarbeit wäre nie möglich gewesen ohne die Unterstützung meiner lieben Ehefrau Eva-Maria. Danke, dass du mir in der langen und manchmal beschwerlichen Zeit immer den Rücken freigehalten hast! Ich freue mich auf viele freie Wochenenden mit dir und will dir an dieser Stelle sagen, dass ich dich über alles liebe!

München, den 15.06.2016

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abstract.....	III
Vorwort.....	V
Inhaltsverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis	XIII
Abbildungsverzeichnis	XV
1 FAS erobern den urbanen Raum	1
1.1 Ansatz und Zielsetzung der Arbeit	4
1.2 Vorgehen.....	5
2 Absicherung und Test von Fahrerassistenzsystemen.....	7
2.1 Sicherheit und Risikobewertung im Sinne der ISO 26262	8
2.2 Der Begriff der Kontrollierbarkeit	11
2.3 Vorgehen zur Absicherung von Fahrerassistenzsystemen.....	13
2.3.1 Absicherung von Fahrerassistenzsystemen der Wirkweisen A und B.....	14
2.3.2 Absicherung von Systemen der Wirkweise C	17
2.3.3 Intendierte Funktionseinschränkung von FAS	19
3 Aspekte einer validen Kontrollierbarkeitsprüfung.....	21
3.1 Versuchsdesign	22
3.1.1 Auswahl von Testfällen	22
3.1.2 Geeignete Pass-/Fail-Kriterien.....	24
3.1.3 Versuchsplan.....	27
3.1.4 Stichprobe	28
3.1.5 Fahrerzustand und Fahrererwartungen im Experiment	29
3.2 Prüfumgebungen	31
3.2.1 Versuche im Realverkehr	31
3.2.2 Versuche auf der Teststrecke.....	32
3.2.3 Fahrsimulatoren	35
3.2.4 Vehicle in the Loop	39
4 Validität von Versuchsergebnissen	45
4.1 KON-Parameter: Evaluation von Simulationsumgebungen	47
4.1.1 Ermittlung der KON-Parameter.....	49
4.1.2 KON-Parameter für das VIL	56
4.1.3 Interpretation der Versuchsergebnisse.....	75

4.2	Transfer von Untersuchungsergebnissen	82
4.2.1	Vorüberlegungen für Transferfunktionen	83
4.2.2	Transfer von Versuchsdaten	88
4.2.3	Kritik am Verfahren und Ausblick	90
5	Controllability-Assessment mit der VIL-Methode	93
5.1	Kontrollierbarkeitsfragen bei Ausweichassistenzsystemen	93
5.1.1	Generierung relevanter Testfälle	96
5.1.2	Ableiten von Pass-/Fail-Kriterien	97
5.2	Testfall 1: Kontrollierbarkeit von Ausweichsystemen aus Sicht anderer Verkehrsteilnehmer	98
5.2.1	Expertenevaluation zur Eingrenzung von Versuchsbedingungen	98
5.2.2	Probandenversuch: Versuchsdesign	101
5.2.3	Probandenversuch: Stichprobe	103
5.2.4	Probandenversuch: Auswertung und Ergebnisse	104
5.2.5	Interpretation der Ergebnisse	110
5.3	Testfall 2: Kontrollierbarkeit von Ausweichsystemen im Nutzenfall ...	113
5.3.1	Versuchsdesign	114
5.3.2	Stichprobe	116
5.3.3	Auswertung und Ergebnisse	117
5.3.4	Interpretation der Ergebnisse	136
5.4	Testfall 3: Kontrollierbarkeit von Falschauslösungen bei Ausweichsystemen	141
5.4.1	Versuchsdesign	141
5.4.2	Auswertung und Ergebnisse	143
5.4.3	Interpretation der Ergebnisse	147
5.5	Fazit	150
5.5.1	Kontrollierbarkeit von KAB-Systemen	150
5.5.2	Methodisches Vorgehen	152
6	Zusammenfassung und Ausblick	155
	Literaturverzeichnis	159
	Eigene Publikationen	181
	Betreute Studentische Arbeiten	183
	Anhang	185
A	Versuchspläne	185
B	Fragebögen	189
	KON-Parameter für das VIL	189
	Fahrerfragebogen	189
	Testfall 1	197
	Testfall 2	201

	Testfall 3	211
C	Statistik	212
	a) KON-Parameter für das VIL	212
	b) Testfall 1	217
	c) Testfall 2	220
	d) Testfall 3	225
D	Vermessung von Sichtwinkeln in VIL und Realfahrzeug	227

Abkürzungsverzeichnis

ACC	Adaptive Cruise Control
ADAS	Advanced Driver Assistent Systems
ALA	Active Lane Assist
ANB	Automatische Notbremse
AR	Augmented Reality
ASIL	Automotive Safety Integrity Level
AWAS	Ausweichassistenzsystem
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
CoP	Code of Practice
DIN	Deutsche Industrie-Norm
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
FAS	Fahrerassistenzsystem
FOT	Field Operational Test
FuSi	Funktionale Sicherheit
GIDAS	German In-Depth Accident Study
HIL	Hardware in the Loop
HMI	Human Machine Interaction
HRA	Hazard Analysis and Risk Assessment
ISO	International Standardization Organization
KA	Kognitive Assistenz
KAB	Kollisionsvermeidung durch Ausweichen und Bremsen
KON	Kontrollierbarkeit
LKW	Lastkraftwagen
MMI	Mensch Maschine Interaktion
MV	Mensch im Verkehr
NCAP	New Car Assessment Programme
NDS	Naturalistic Driving Studies
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PKW	Personenkraftwagen
QM	Qualitätsmanagement
SBFV	Skala zur Bewertung von Fahr- und Verkehrssituationen
SBS	Störungsbewertungsskala
SIL	Software in the Loop
UR:BAN	Urbaner Raum: Benutzergerechte Assistenzsysteme und Netzmanagement
VDE	Verband der Elektrotechnik und Elektronik
VIL	Vehicle in the Loop
VP(n)	Versuchsperson(en)
VR	Virtual Reality

WIVW	Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften
WÜ	Wiener Übereinkommen über den Straßenverkehr

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: ASIL Bestimmungsmatrix (ISO 26262-3 2011, S. 10)	10
Tabelle 2: Kontrollierbarkeitsstufen nach (ISO 26262-3 2011, S.9, vom Autor übersetzt)	10
Tabelle 3: Erweiterung der Übersicht zu Validierungsstudien von Neukum et al. (2013, S. 60) zitiert nach Mullen et al. (2011, S. 13-5 - 13-6)	38
Tabelle 4: Reihenfolgen für Zeitlücke bewerten (ZB) und herstellen (ZH).....	51
Tabelle 5: Reihenfolgen für TTC schätzen (TTC)	52
Tabelle 6: Reihenfolgen der Gassenbreiten (GB).....	53
Tabelle 7: Reihenfolgen Folgefahrt mit Beschleunigen (FB) und Verzögern (FV).....	54
Tabelle 8: Reihenfolgen Querverkehr (QV).....	55
Tabelle 9: Stichproben-Charakteristika nach Prüfumgebung.....	57
Tabelle 10: Identifizierte Gefahrensituationen	94
Tabelle 11: Mögliche Ursachen für Gefahrensituationen mit Wahrscheinlichkeit	95
Tabelle 12: Testfälle zur frühen Kontrollierbarkeitsbewertung von KAB-Systemen....	96
Tabelle 13: Parameter im Vorversuch.....	99
Tabelle 14: Parameter-Sets für den Probandenversuch.....	101
Tabelle 15: Gruppen im Versuchsplan	115
Tabelle 16: Versuchsplan zur Ermittlung von KON-Parametern.....	185
Tabelle 17: Versuchsplan für Testfall 1	186
Tabelle 18: Versuchsplan für Testfälle 2 und 3.....	187
Tabelle 19: ZB: SBFV-Urteil, HZ: THW bei Tastendruck.....	212
Tabelle 20: TTC: Subjektivurteile und Einschätzung der TTC.....	212
Tabelle 21: GB: SBFV-Urteil und Einfahrtgeschwindigkeit in die Gasse.....	213
Tabelle 22: GB: Mittlere Spurabweichung und Betrag der maximalen Spurabweichung	213
Tabelle 23: FV: SBFV-Urteil, Reaktionszeit und maximale Verzögerung.....	214
Tabelle 24: FB: Reaktionszeit und maximale Beschleunigung.....	214
Tabelle 25: SBFV-Urteil bei "Ausweichen" und "Bremsen"	215
Tabelle 26: QV: min. Abstand zum Querfahrzeug bei "Ausweichen" und Bremsen"	215
Tabelle 27: QV: Reaktionszeiten bei "Ausweichen" und "Bremsen".....	215
Tabelle 28: QV: maximale Verzögerung bei "Ausweichen " und "Bremsen"	216
Tabelle 29: QV: "Ausweicher": Querversatz und maximale Querschleunigung	216
Tabelle 30: Reaktionszeiten - Post-hoc t-Tests	217
Tabelle 31: Abstand zum ausweichenden Fahrzeug - Post-hoc t-Tests	217
Tabelle 32: Querversatz - Post-hoc t-Tests.....	218
Tabelle 33: Maximale Querschleunigung - Post-hoc t-Tests.....	218
Tabelle 34: Maximale Verzögerung - Post-hoc t-Tests.....	219
Tabelle 35: SBFV-Urteil - Post-hoc Wilcoxon/Mann-Whitney-U-Tests.....	219

Tabelle 36: Vergleich Erstkontakt - Zweitkontakt: Deskriptive Statistik	220
Tabelle 37: Vergleich Erstkontakt - Zweitkontakt: Signifikanztests.....	221
Tabelle 38: Varianzanalyse: Faktoren Prüfumgebung, Assistenz, Gegenfahrbahn	222
Tabelle 39: Faktor Assistenz - post-hoc t-Tests	223
Tabelle 40: Faktor Prüfumgebung: Korrelationen zwischen VIL und Realfahrzeug...	224
Tabelle 41: t-Tests für unabhängige Stichproben (Realfahrzeug - VIL) und einfaktorielle Varianzanalyse (Assistenz)	225
Tabelle 42: Faktor Assistenz - post-hoc- t-Tests	225
Tabelle 43: Korrelationen zwischen VIL und Realfahrzeug	226

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Brems- und Ausweichabstände bei verschiedenen Geschwindigkeiten (Dang et al. 2012, S. 763)	3
Abbildung 2: Vorgehen zur Entwicklung der VIL-Methode	5
Abbildung 3: Typische Zeithorizonte der Navigations-, Führungs- und Stabilisierungsaufgabe (Donges 2012)	7
Abbildung 4: FAS-Einteilung nach Wirkweise und Automatisierungsgrad (Gasser 2014)	8
Abbildung 5: Absenkung des Risikos durch Sicherheitsmaßnahmen	9
Abbildung 6: Klassifikation von Auslösungen von FAS (Weitzel 2013b, S. 5)	12
Abbildung 7: Vorgehen zur Kontrollierbarkeitsbewertung bei der FAS-Entwicklung..	13
Abbildung 8: Leitfäden zur Absicherung verschiedener FAS vor dem Hintergrund der ISO 26262	15
Abbildung 9: Störungsbewertungsskala - SBS (Neukum und Krüger 2003) und Skala zur Bewertung von Fahr- und Verkehrssituationen - SBFV (Neukum et al. 2008a)	26
Abbildung 10: Pass-/Fail-Procedere anhand Subjektivurteilen bei Querdynamikstörung (Neukum et al. 2013, S. 53)	26
Abbildung 11: Dummy-Target EVITA mit Zugfahrzeug (Hoffmann und Winner 2012, S. 70)	33
Abbildung 12: Seitenausleger-Crashmatic von Bosch	34
Abbildung 13: Seitliches Dummy-Target CAPLOS	34
Abbildung 14: Sitzkiste der TU Kaiserslautern (Lehrstuhl für Mechatronik in Maschinenbau und Fahrzeugtechnik 2011) und statischer Fahrsimulator der BASt (Frey 2014, S. 38)	36
Abbildung 15: Dynamische Simulatoren des WIVW (Frey 2014, S. 40) und der Daimler AG (Breuer 2012, S. 58)	36
Abbildung 16: Funktionsweise des VIL.....	40
Abbildung 17: Detailreiche (links), detailarme Welt (mittig) und reale Teststrecke (rechts) (Karl et al. 2013, S. 48).....	41
Abbildung 18: Ökologische Validität verschiedener Prüfumgebungen (Purucker et al. 2014, S. 422)	45
Abbildung 19: Vorgehen zur Evaluation von Simulationsumgebungen	48
Abbildung 20: Zeitlücke bewerten (ZB, links) und Zeitlücke herstellen (ZH, rechts) ..	51
Abbildung 21: TTC - Abschätzen der TTC nach Zeitpunkten (1-5), schematisch	52
Abbildung 22: Szenario zur Wahrnehmung von Querabständen (GB), schematisch	53
Abbildung 23: Vorderfahrzeug verzögert (FV, links) und beschleunigt (FB, rechts)....	54
Abbildung 24: Querverkehrsszenario (QV), schematisch.....	55
Abbildung 25: ZB - Subjektivurteile (links, $n = 180$) und ZH - THW (rechts, $n = 180$)	58
Abbildung 26: Zusammenhang der THW zwischen VIL und Realfahrzeug	59

Abbildung 27: TTC - Subjektivurteil (links, $n = 180$) und Schätzung (rechts, $n = 180$)	60
Abbildung 28: Zusammenhang der TTC zwischen VIL und Realfahrzeug.....	60
Abbildung 29: GB - Subjektivurteile (links, $n = 240$) und Gassen- Einfahrtsgeschwindigkeit (rechts, $n = 240$)	61
Abbildung 30: GB - mittlere (links, $n = 240$) und maximale (rechts, $n = 240$) Spurabweichung in der Gasse	62
Abbildung 31: Zusammenhang von Einfahrtsgeschwindigkeit (links) und Spurposition (rechts) zwischen Realfahrzeug und VIL.....	63
Abbildung 32: FV - Subjektivurteile ($n = 180$)	64
Abbildung 33: FV - Reaktionszeit (links, $n = 180$) und maximale Verzögerung (rechts, $n = 180$)	65
Abbildung 34: Zusammenhang der Reaktionszeit (links) und der maximalen Verzögerung (rechts) zwischen Realfahrzeug und VIL.....	65
Abbildung 35: FB - Reaktionszeit (links, $n = 180$) und maximale Beschleunigung (rechts, $n = 180$)	66
Abbildung 36: FB - Zusammenhang von Reaktionszeit (links) und maximaler Beschleunigung (rechts) zwischen VIL und Realfahrzeug.....	67
Abbildung 37: QV - Manöverwahl ($n = 180$).....	68
Abbildung 38: QV - SBFV-Urteil bei "Ausweichen" ($n = 100$) und "Bremsen" ($n =$ 80)	69
Abbildung 39: QV - minimaler Abstand zum Querfahrzeug bei "Ausweichen" ($n =$ 100) und "Bremsen" ($n = 80$).....	70
Abbildung 40: Zusammenhang zwischen VIL und Realfahrzeug beim minimalen Abstand zum Querfahrzeug, aufgeteilt nach Manöver	70
Abbildung 41: QV - Reaktionszeiten bei "Ausweichen" ($n = 100$) und "Bremsen" ($n =$ 80)	71
Abbildung 42: Zusammenhang der Reaktionszeiten zwischen VIL und Realfahrzeug bei "Ausweichen" und "Bremsen".....	72
Abbildung 43: QV - Maximale Verzögerung bei "Ausweichen" ($n = 100$) und "Bremsen" ($n = 80$)	72
Abbildung 44: Zusammenhang zwischen VIL und Realfahrzeug bei der maximalen Verzögerung, aufgeteilt nach Manöver.....	73
Abbildung 45: QV - Querversatz (links, $n = 100$) und maximale Querschleunigung (rechts, $n = 100$) bei "Ausweichen"	74
Abbildung 46: Zusammenhang zwischen VIL und Realfahrzeug bei Querversatz (links) und maximaler Querschleunigung (rechts) bei "Ausweichen"	74
Abbildung 47: Wahrscheinlichkeiten für SBFV-Urteile in verschiedenen Prüfumgebungen (Purucker et al. 2014)	83
Abbildung 48: Vereinfachte Darstellung des Fahrer-Informationsverarbeitungsprozesses	84
Abbildung 49: Mittlere Ausweichtrajektorie im Realfahrzeug (grün) und VIL (blau) mit Standardabweichung bei der Bedingung 50 km/h	85

Abbildung 50: Mittlere Geschwindigkeitsverläufe mit Standardabweichung in VIL (blau) und Realfahrzeug (grün) bei einer Verzögerung des TO von 3 m/s^2 (schwarz).....	86
Abbildung 51: Reaktionszeiten in Abhängigkeit des äußeren Reizes (Betrag der Verzögerung des TO).....	87
Abbildung 52: Durchschnittliche Verzögerung mit zugehöriger Reaktionszeit der Fahrer bei einer Verzögerung des TO von 3 m/s^2	88
Abbildung 53: Schrittweise Korrektur der Geschwindigkeitsverläufe.....	89
Abbildung 54: Geschwindigkeitsverläufe vor (links) und nach Transformation (rechts) mit Vergleichsgruppe	90
Abbildung 55: Parameter zur Charakterisierung von Ausweichtrajektorien.....	98
Abbildung 56: Ausweichsituation schematisch (links) und aus Ego-Perspektive (rechts)	100
Abbildung 57: Ergebnisse des Expertenversuches.....	100
Abbildung 58: Fahrsituationen: Rechtsabbieger (links), Kind (Mitte) und Falschauslösung (rechts) aus der Sicht des Fahrers	102
Abbildung 59: Reaktionszeiten nach Parameter-Set und Fahrsituation ($n = 144$)	105
Abbildung 60: Minimaler Abstand zum ausweichenden Fahrzeug nach Parameter-Sets und Fahrsituation ($n = 144$).....	106
Abbildung 61: Querversatz nach Parameter-Sets und Fahrsituation ($n = 144$).....	107
Abbildung 62: Maximale Querschleunigung nach Parameter-Sets und Fahrsituation ($n = 144$).....	108
Abbildung 63: Maximale Verzögerung nach Parameter-Sets und Fahrsituation ($n = 144$)	109
Abbildung 64: SBFV-Urteil nach Parameter-Sets und Fahrsituation ($n = 144$)	110
Abbildung 65: Gerichtetes Lenkmoment (links) und Soll-Ausweichtrajektorie (rechts)	114
Abbildung 66: Ausweichsituation auf der Teststrecke (links), mit belegtem Gegenfahrstreifen (Mitte) und im VIL (rechts)	116
Abbildung 67: Phasen eines Ausweichmanövers bei Systemeingriff	117
Abbildung 68: Vorzeichen der abhängigen Variablen bei einem Ausweichmanöver..	118
Abbildung 69: Interaktion Fahrer - System "Ausweichempfehlung"	120
Abbildung 70: Interaktion Fahrer - System "Führung"	121
Abbildung 71: Fahrer ohne System	122
Abbildung 72: Assistenz - TTC bei Fahrzeugreaktion (links, $n = 96$) und maximale Verzögerung (rechts, $n = 96$)	123
Abbildung 73: Assistenz - Querversatz (links, $n = 96$) und minimaler Abstand zum Querverkehr (rechts, $n = 96$)	124
Abbildung 74: Assistenz - minimales und maximales Handlenkmoment ($n = 96$).....	124
Abbildung 75: Assistenz - maximale und minimale Gierrate ($n = 96$)	125
Abbildung 76: Assistenz - maximale und minimale Querschleunigung ($n = 96$)	126
Abbildung 77: Assistenz - SBFV-Urteil ($n = 48$).....	126

Abbildung 78: Interaktion Fahrer - System "Ausweichempfehlung" bei belegtem Gegenfahrstreifen	127
Abbildung 79: Interaktion Fahrer - System "Führung" bei belegtem Gegenfahrstreifen	128
Abbildung 80: Gegenfahrstreifen - TTC bei Fahrzeugreaktion (links, $n = 96$) und maximale Verzögerung (rechts, $n = 96$).....	129
Abbildung 81: Gegenfahrstreifen - Querversatz (links, $n = 96$) und minimaler Abstand zum Querverkehr (rechts, $n = 96$)	129
Abbildung 82: Gegenfahrstreifen - minimales und maximales Handlenkmoment ($n = 96$).....	130
Abbildung 83: Gegenfahrstreifen - maximale und minimale Gierrate ($n = 96$).....	131
Abbildung 84: Gegenfahrstreifen - maximale und minimale Querbeschleunigung ($n = 96$).....	131
Abbildung 85: Gegenfahrstreifen - SBFV-Urteil ($n = 48$)	132
Abbildung 86: Prüfumgebung - TTC bei Fahrzeugreaktion (links, $n = 96$) und maximale Verzögerung (rechts, $n = 96$)	133
Abbildung 87: Prüfumgebung - Querversatz (links, $n = 96$) und minimaler Abstand zum Querverkehr (rechts, $n = 96$)	134
Abbildung 88: Prüfumgebung - minimales und maximales Handlenkmoment ($n = 96$)	134
Abbildung 89: Prüfumgebung - maximale und minimale Querbeschleunigung ($n = 96$)	135
Abbildung 90: Prüfumgebung - maximale und minimale Gierrate ($n = 96$).....	135
Abbildung 91: Prüfumgebung - SBFV-Urteil ($n = 48$)	136
Abbildung 92: Falschauslösung - Querversatz (links, $n = 48$) und maximale Verzögerung (rechts, $n = 48$)	144
Abbildung 93: Falschauslösung - minimales und maximales Handlenkmoment ($n = 48$)	145
Abbildung 94: Falschauslösung - maximale und minimale Querbeschleunigung ($n = 48$)	146
Abbildung 95: Falschauslösung - maximale und minimale Gierrate ($n = 48$)	146
Abbildung 96: Falschauslösung - SBS-Urteil ($n = 48$)	147

1 FAS erobern den urbanen Raum

"Die gesellschaftlichen Kosten der Individualmobilität müssen gesenkt werden" (Bengler et al. 2012, S. 2). Damit fordern die Autoren¹ des Strategiepapiers "Die Zukunft der Fahrerassistenz" eine Verminderung der benötigten Ressourcen für Mobilität, eine Steigerung der Effizienz des Verkehrs und eine Senkung der Unfallzahlen (Bengler et al. 2012). Diesen Zielen stehen die gesellschaftlichen Entwicklungen gegenüber, mit rasant wachsendem Verkehrsaufkommen in Entwicklungsländern und zunehmender Urbanisierung in den Industrienationen (vgl. Proff 2011). Doch im Anbetracht der aktuellen Stadtentwicklung, im Gegensatz zur anhaltenden Landflucht bis zur Jahrtausendwende, zieht es die Menschen heute zum Wohnen wieder vermehrt "ins Grüne" vor die Tore der Stadt. Die durchschnittlichen Wege zum Arbeitsplatz erhöhen sich dadurch auf 39 zurückgelegte Kilometer am Tag (Bläser und Schmidt 2011). Mit einem derartig erhöhten Pendleraufkommen sind wiederum neue Herausforderungen für Mobilitätskonzepte verbunden. Trotz des Ausbaus öffentlicher Verkehrssysteme und des Vorantreibens von Car-Sharing-Konzepten wird der motorisierte Individualverkehr auch künftig einen Großteil des Personenverkehrsaufwands ausmachen (Bläser und Schmidt 2011). Der Komfort des eigenen PKW wird häufig sogar den bis zu einer Stunde kürzeren Fahrten im ÖPNV vorgezogen (Follmer et al. 2010).

Im Bereich der Ressourcenschonung könnten trotz des erwartet höheren Verkehrsaufkommens Elektrofahrzeuge zur Verringerung der CO₂-Emissionen künftig einen Beitrag leisten, vorausgesetzt der Strom zum Aufladen dieser Fahrzeuge stammt aus erneuerbaren Energiequellen (Bertram und Bongard 2014). Doch auch wenn Elektrofahrzeuge aktuell die verkehrspolitischen Diskussionen dominieren, werden diese in Zukunft nicht wesentlich zur Reduzierung von Unfällen oder zur Effizienzsteigerung des Verkehrs beitragen können (Bengler et al. 2012). Auch Ansätze zur autogerechteren Gestaltung der Städte durch Baumaßnahmen haben wenig Zukunftspotential, da der Raum für neue Verkehrswege schlicht nicht vorhanden ist (Bläser und Schmidt 2011). Effizienzsteigerungen müssen deshalb innerhalb der gegebenen Infrastrukturgrenzen stattfinden.

¹ Mit allen Funktionsbezeichnungen sind Frauen und Männer in gleicher Weise gemeint. Eine sprachliche Differenzierung im Wortlaut wird aus Gründen der Klarheit und Verständlichkeit dieser Arbeit nicht vorgenommen.

Den Schlüssel dazu stellen daher smarte, kooperierende Systeme dar (Bengler et al. 2012). Diese können - wie zum Beispiel bei Kooperativem ACC (van Arem et al. 2006), oder wie bei der elektronischen Deichsel im Nutzfahrzeugbereich gezeigt (Winterhagen 1999) - durch Kommunikation zwischen den Fahrzeugen viel geringere Abstände in einer Kolonne fahren und somit den Verkehrsdurchsatz erhöhen. Über Vernetzung mit der Infrastruktur, deren Einbindung in die Kooperation und daraus ableitbaren Applikationen wie "Grüne-Welle-Assistenz" oder verkehrsflussoptimierte, "smarte Kreuzungen" lässt sich der Durchsatz weiter steigern und optimieren (UR:BAN 2012a, 2012b, 2014; Kerner et al. 2014).

Die oben genannten Funktionen sind Bestandteil des deutschen Forschungsprojekts "Urbaner Raum: Benutzergerechte Assistenzsysteme und Netzmanagement", kurz UR:BAN (Lehsing et al. 2013). Die Initiative ist Nachfolger der Forschungsprojekte INVENT (INVENT 2005) und AKTIV (AKTIV 2011), die sich mit Technologien für intelligenten Verkehr auseinandersetzten, deren Fokus jedoch weitgehend auf dem Autobahnverkehr lag. Bei der Forschungsinitiative UR:BAN gibt es hingegen einen klaren Trend zur Stadt. Allen Förderprojekten gemein ist jedoch, dass nicht nur die Effizienzsteigerung eine Projektsäule darstellt, sondern auch die Unfallvermeidung eine große Rolle spielt.

Die Notwendigkeit machen Prognosen zu Verkehrsunfällen mit Todesfolge klar, die bis zum Jahr 2020, vor allem aufgrund der steigenden Zahlen in den Entwicklungsländern, eine Gesamtsteigerung von 66% (Koppits und Cropper 2005) erwarten lassen. Damit dennoch Ziele wie "Vision Zero" (Vision Zero Initiative 2011) zumindest in den Industrienationen ins Auge gefasst werden können, müssen enorme Anstrengungen im Bereich der Fahrzeugsicherheit unternommen werden. Die Ursache für Unfälle mit Personenschäden sind fast immer menschliche Fehler (DESTATIS 2013) und das Potential passiver Sicherheitsmaßnahmen, wie Sicherheitsgurte oder Fußgängerairbags, ist in modernen Oberklasse-PKW schon fast vollständig ausgereizt (Kompass et al. 2012). Im Rahmen der integralen Sicherheit müssen dem Fahrer deshalb aktive Sicherheitssysteme zur Seite gestellt werden, die intelligent mit passiven Maßnahmen verknüpft sind und rechtzeitig warnen oder autonom ins Fahrzeuggeschehen eingreifen (Kompass et al. 2012).

In zahlreichen Untersuchungen wurde nachgewiesen, wie viele Unfälle theoretisch durch solche Fahrerassistenzsysteme vermieden werden könnten (vgl. Eckstein und Zlocki 2013; Eichberger et al. 2011; Hummel 2011; Färber et al. 2011; Christen et al. 2009; Benminoun et al. 2014). Durch die Pflichteinführung von ESP in Neuwagen ab dem

01.01.2014 wird ein Rückgang der tödlichen Verkehrsunfälle um 15-20% erwartet (Krems 2013). Die Einführung eines Notbremsassistenten mit Fußgängererkennung hat zusätzlich ein Potential von 21 % (Hummel 2011). Aus den Zahlen der Unfallforschung der Versicherer zeigt sich aber auch, dass vor allem Kollisionen mit Radfahrern oder Fußgängern aufgrund der hohen Differenzgeschwindigkeiten durch Bremsen alleine oft nicht vermieden werden können (Hummel 2011).

Wenn ein Kollisionsobjekt allerdings zu nah für ein erfolgreiches Bremsmanöver ist, gibt es ab einer Geschwindigkeit von 35 km/h einen Distanzbereich, in dem ein Ausweichmanöver zur Vermeidung des Unfalls führen kann (vgl. Abbildung 1).

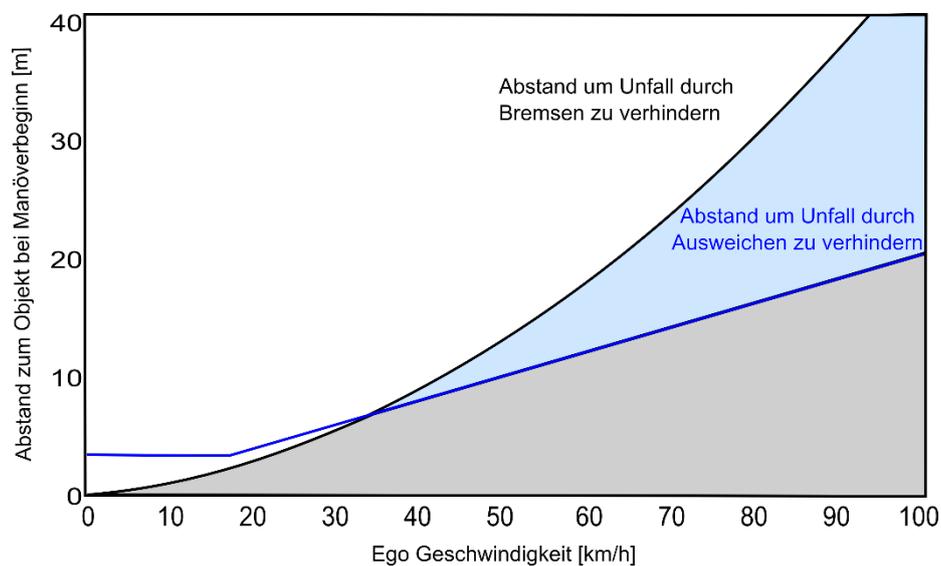


Abbildung 1: Brems- und Ausweichabstände bei verschiedenen Geschwindigkeiten (Dang et al. 2012, S. 763)

Dies machen sich die in UR:BAN entwickelten Systeme zur Kollisionsvermeidung durch Ausweichen und Bremsen (KAB) zu Nutze (Scholz et al. 2013). Sie sollen, wenn ein Fahrer nicht rechtzeitig selbst reagiert, das Fahrzeug durch Eingriffe in Längs- und Querrichtung um ein Hindernis herum lenken und die Geschwindigkeit dabei vermindern.

Solche mehrdimensionalen Eingriffe in die Fahrzeugführung erfordern nicht nur von der Funktionsseite eine besondere Systemarchitektur und Absicherung (vgl. Winner 2013; Maurer 2013), sondern bedeuten auch eine außergewöhnliche Belastung des Fahrers (vgl. Vollrath und Krems 2011). Für ein optimales und sicheres Zusammenwirken, auch in kritischen Fahrsituationen, müssen die Einflüsse des Fahrers bei der Funktionsentwicklung berücksichtigt werden. In UR:BAN (Überblick siehe Bengler et al. 2014) wurde zu diesem Zweck die Projektsäule "Mensch im Verkehr" eingeführt, welche sich speziell mit

der bedürfnisgerechten Gestaltung und Auslegung von Assistenzfunktionen beschäftigt (Manstetten et al. 2013).

1.1 Ansatz und Zielsetzung der Arbeit

Zur bedürfnisgerechten Gestaltung und Auslegung von KAB-Systemen fordern u.a. Dang et al. (2012), dass Fahrer jederzeit verstehen sollen, was passiert und sie nicht irritiert werden sollen, was wiederum möglicherweise falsche (Schreck-)Reaktionen hervorrufen könnte. Zusätzlich müssen sie immer in der Lage sein, das System zu übersteuern. Diese Forderungen sind auch in einschlägigen Werken zu funktionaler Sicherheit bzw. zur Untersuchung der Kontrollierbarkeit von Fahrerassistenzsystemen wie der ISO 26262 (ISO 26262 2011) oder dem Response Code of Practice (RESPONSE Consortium 2009) enthalten.

Auf Grundlage der erwähnten Richtlinien werden in dieser Arbeit die Anforderungen einer Kontrollierbarkeitsprüfung in Anbetracht der neuen KAB-Funktionen beleuchtet. Im Controllability-Assessment gemäß ISO 26262 müssen schon in frühen Stadien des Entwicklungsprozesses solcher FAS-Funktionen Abschätzungen ihrer Beherrschbarkeit durch den Fahrer erfolgen (ISO 26262-3 2011). Vor allem bei aktiven Sicherheitsfunktionen stellt dies eine große Herausforderung dar, da solche Betrachtungen von vielen Dimensionen wie Fahrer, Umweltparametern oder der Auslegung der FAS-Funktion abhängen (Weitzel 2013a). Eine valide Abschätzung ohne empirischen Beleg ist aufgrund der Komplexität der Zusammenhänge in diesem Fall nur schwer möglich. Andererseits mangelt es in frühen Entwicklungsstadien an Methoden zur Gewinnung belastbarer Untersuchungsergebnisse, weshalb diese wiederum parallel zu den FAS-Funktionen entwickelt und etabliert werden müssen, um spätestens kurz vor Serienreife auch für die finale Kontrollierbarkeitsbewertung zur Verfügung zu stehen.

Ziel ist es, eine Gesamtmethode vorzustellen, mit der KAB-Systeme ressourcenschonend und valide unter Einbezug des menschlichen Fahrers getestet werden können: die "VIL-Methode". Diese soll im frühen konzeptionellen Stadium des Entwicklungsprozesses etabliert werden; es sollen aber auch Hinweise zur finalen Kontrollierbarkeitsprüfung für serienfertige Funktionen erfolgen.

1.2 Vorgehen

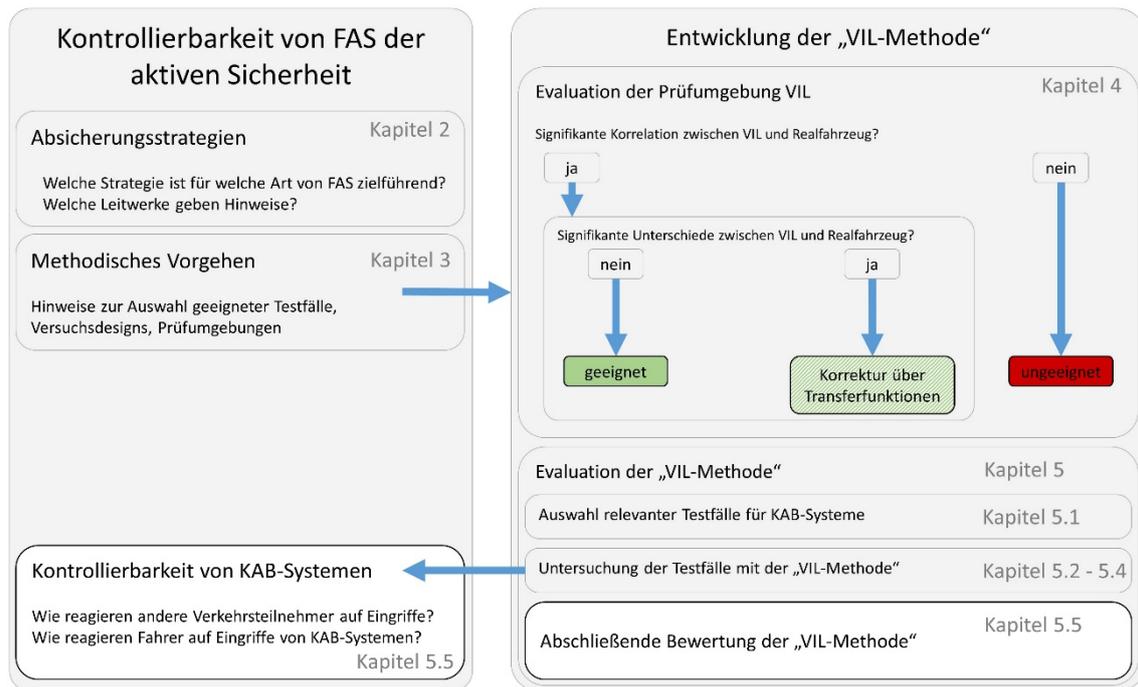


Abbildung 2: Vorgehen zur Entwicklung der VIL-Methode

Abbildung 2 zeigt auf der linken Seite den Kontext, in dem die entwickelte "VIL-Methode" (rechts) zu sehen ist. Die zugrunde liegenden Kapitel sollen einen Überblick über die Rahmenbedingungen zur Prüfung und Absicherung von FAS bieten. Sie bilden die Basis für die Entwicklung der "VIL-Methode". In Kapitel 2 werden zunächst Absicherungsstrategien für verschiedene FAS auf Grundlage der bestehenden Kontrollierbarkeits-Literatur vorgestellt. Mit welchen Methoden so eine Absicherung durchgeführt werden kann, wird in Kapitel 3 betrachtet. Eine Methode zur Prüfung von FAS subsumiert dabei verschiedene Aspekte, die von der Auswahl geeigneter Testfälle, Stichproben und Versuchsplänen, bis hin zur Wahl einer Prüfumgebung reichen.

Die "VIL-Methode" stellt eine Kontrollierbarkeits-Methodik dar, die unter Berücksichtigung der vorgestellten etablierten Verfahren und der gleichnamigen Prüfumgebung "Vehicle in the Loop", kurz VIL, entstand. Das VIL ist ein Hybrid aus Sichtsimulation und Realfahrzeug, das neue Zugänge bei Kontrollierbarkeitsfragen verspricht. Dessen Eignung für Kontrollierbarkeitsprüfungen wird in Kapitel 4 evaluiert, was in einer empirischen Gegenüberstellung mit einem Realfahrzeug auf der Teststrecke erfolgt. In beiden Prüfumgebungen werden in einem Probandenversuch basale Manöver aus dem Alltag des Normalfahrers untersucht, auf deren Grundlage erste Erkenntnisse zur Eignung der jeweiligen Plattform für gewisse Manöver-Kategorien gewonnen werden.

Ergebnisse, die in Simulationsumgebungen erfasst wurden, können aufgrund einer Vielzahl von Faktoren Unterschiede zu denen aus dem Realfahrzeug aufweisen, je nachdem wie gut ein Szenario abgebildet werden kann. Für binär (ja oder nein) zu beantwortende Kontrollierbarkeitsfragen können auch kleine Unterschiede zu falschen Urteilen führen. In einem sequentiellen Verfahren wird deshalb zunächst überprüft, ob das Fahrerverhalten generell einen Zusammenhang zwischen Realfahrzeug und VIL aufweist (vgl. Abbildung 2). Gilt diese Grundvoraussetzung als erfüllt, ist es essentiell, dass Richtung und Betrag möglicher Abweichungen zwischen Simulator und Realfahrzeug bekannt sind. Existieren Abweichungen außerhalb statistischer Streuungen, können diese mittels Transferfunktionen korrigiert werden. Das Vorgehen dazu ist in Kapitel 4.2 beschrieben.

Nach der Evaluation der Prüfumgebung erfolgt in einem zweiten Schritt die Evaluation der Gesamtmethodik anhand exemplarischer Testfälle. Im Abgleich mit bestehenden Verfahren wird die "VIL-Methode" überprüft und deren Eignung bewertet. Die gewonnenen Erkenntnisse über die Kontrollierbarkeit der KAB-Systeme fließen in die weiteren Entwicklungszyklen der Funktionen ein.

2 Absicherung und Test von Fahrerassistenzsystemen

"Fahrerassistenzsysteme unterstützen den Fahrer bei seiner primären Fahraufgabe. Sie informieren und warnen ihn, erhöhen seinen Komfort und die Sicherheit, indem sie ihn aktiv bei seiner Fahrzeugführung und Fahrzeugstabilisierung unterstützen" (Reif 2010, S. 104). Abzugrenzen davon sind Fahrerinformationssysteme (FIS), denen Systeme zugeordnet werden, die in keinem unmittelbaren Zusammenhang zur Fahraufgabe stehen (z.B. Bordcomputer oder Multimediasystem) (Färber 2005). Weiterhin soll sich der in dieser Arbeit verwendete Begriff der Fahrerassistenzsysteme (FAS) auf die von Maurer (2012, S. 43) definierten "Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung" beschränken. Eine Einteilung der FAS erfolgt häufig anhand der von Donges (2012) publizierten Erweiterung des Drei-Ebenen-Modells nach Rasmussen (Rasmussen 1983). FAS der Navigationsebene unterstützen den Fahrer bei der Routenwahl und der Planung des zeitlichen Verlaufs der Fahraufgabe (z.B. Navigationssystem, Grüne-Welle-Assistent). Systeme der Führungs- und Stabilisierungsebene hingegen helfen dem Fahrer bei der Wahl geeigneter Führungsgrößen wie Sollspur, Sollabständen oder Sollgeschwindigkeit und deren Einhaltung. Dabei ist es sinnvoll eine Unterscheidung von Zeitbereichen einzuführen, in denen ein FAS wirkt (vgl. Abbildung 3).

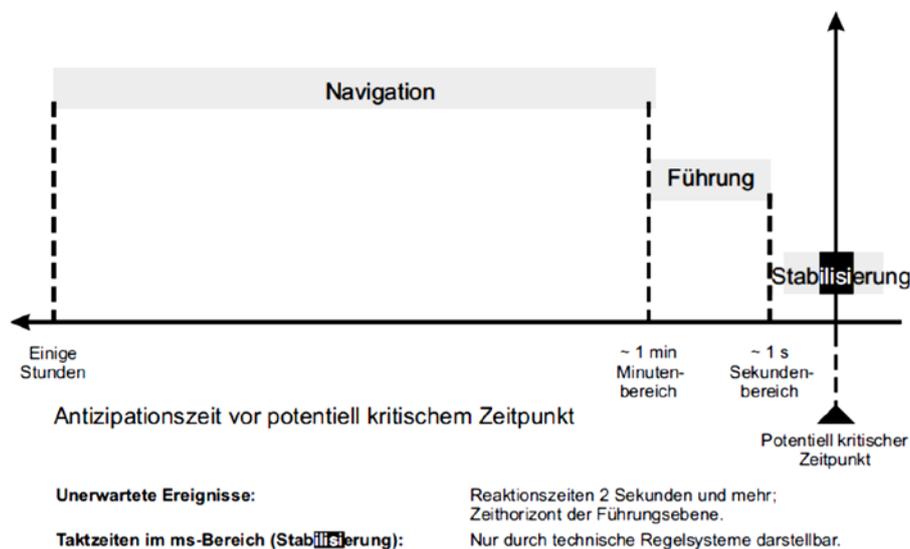


Abbildung 3: Typische Zeithorizonte der Navigations-, Führungs- und Stabilisierungsaufgabe (Donges 2012)

Donges (2012) geht hier von einem potentiell kritischen Zeitpunkt aus und zieht bei ca. zwei Sekunden davor eine Grenze, da dies der Mindest-Antizipationszeit bei unerwarteten Ereignissen entspräche (Donges 2012, S. 22). Im Zeithorizont der Führungsebene

(Zeithorizont größer als zwei Sekunden) sind dann FAS mit informierendem (z.B. Verkehrszeichenerkennung) oder warnendem Charakter (z.B. Spurverlassenswarnung) sowie kontinuierlich regelnde FAS (z.B. Abstandsregeltempomat) angesiedelt. Auf der Stabilisierungsebene siedeln sich automatisch eingreifende Assistenzsysteme wie das elektronische Stabilisierungsprogramm (ESP) oder die Automatische Notbremse (ANB) an (vgl. Donges 2012).

In Anlehnung daran hat auch die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) folgende Einteilung unternommen (Gasser 2012):

Wirkweise A: Informierende und warnende Funktionen	Wirkweise B: Kontinuierlich automatisierende Funktionen	Wirkweise C: Eingreifende Notfallfunktionen (unfallgeneigte Situation)		
			5	Autonomie/ Fahrerlosigkeit?
			4	Vollautomatisierung: System übernimmt Quer- und Längsführung vollständig und dauerhaft, bei <u>Ausbleiben der Fahrerübernahme wird das System selbsttätig in den risikominimalen Zustand zurückkehren.</u>
			3	Hochautomatisierung: System übernimmt Längs- und Querführung, der Fahrer muss <u>nicht mehr dauerhaft überwachen</u> . Der Fahrer <u>muss</u> die Steuerung erst nach Aufforderung <u>mit gewisser Zeitreserve übernehmen</u> .
			2	Teilautomatisierung: System übernimmt <u>Quer- und Längsführung</u> , der Fahrer muss weiterhin <u>dauernd überwachen</u> und die Steuerung ggf. jederzeit übernehmen.
			1	Assistenz: Fahrer führt dauerhaft <u>entweder die Quer- oder die Längsführung</u> aus. Die andere Fahraufgabe wird <u>in Grenzen vom FAS</u> ausgeführt.
			0	Driver only: Fahrer führt Quer- und Längsführung aus.

Abbildung 4: FAS-Einteilung nach Wirkweise und Automatisierungsgrad (Gasser 2014)

Diese unterscheidet, wie in Abbildung 4 links zu sehen, zunächst zwischen informierenden/warnenden Systemen (Wirkweise A), kontinuierlich automatisierenden Funktionen (Wirkweise B) und eingreifenden Notfallfunktionen (Wirkweise C). Bei Wirkweise B wird zusätzlich der Automatisierungsgrad eines Systems betrachtet (vgl. Abbildung 4, rechts). Diese Einteilung besitzt Relevanz für die nötigen Maßnahmen zur Absicherung, wie im weiteren Verlauf erläutert wird.

2.1 Sicherheit und Risikobewertung im Sinne der ISO 26262

Gemäß dem Wiener Übereinkommen über den Straßenverkehr (WÜ) muss jeder Fahrer "dauernd sein Fahrzeug [...] beherrschen können" (WÜ, deutsche Übersetzung, Art.13 Abs. 1, S.1). Dies hat Auswirkungen auf das Produkthaftungsrecht, wodurch der Hersteller verpflichtet ist, den Nachweis der Sicherheit für ein FAS vor Markteinführung zu erbringen (Seeck und Gasser 2006). Gleiches ergibt sich aus der ISO-Norm 26262, die für die Freigabe von FAS verschiedene Sicherheitsnachweise fordert (ISO 26262, 2011).

Gemäß DIN VDE 31000 Teil 2 ist Sicherheit "eine Sachlage, bei der das Risiko nicht größer als das Grenzkrisiko ist" (DIN VDE 31000-2, S. 14). Das Risiko ist dabei "die Kombination der Wahrscheinlichkeit des Eintretens von (durch Gefährdungen verursachten) Unfällen und Zwischenfällen, die zu einem Schaden führen, und des Ausmaßes dieses Schadens" (Braband 2013, S. 556). In den Ingenieurwissenschaften wird diese Definition oft mit Auftretenswahrscheinlichkeit mal Schadensschwere abgekürzt (DIN VDE 31000, S. 13). Der Begriff des Grenzkrisikos beschreibt dabei das Risiko, das basierend auf den vorherrschenden gesellschaftlichen Wertvorstellungen gerade noch akzeptabel ist und wird z.B. über die minimale endogene Mortalität abgeleitet (vgl. Braband 2013, S. 556). Eine grafische Darstellung der Zusammenhänge ist in Abbildung 5 zu finden.

Das Risiko durch ein System muss gemäß ISO 26262 mit geeigneten Maßnahmen mindestens unter das Grenzkrisiko gesenkt werden (vgl. Abbildung 5), wobei das Grenzkrisiko keine konstante Größe darstellt, sondern sich aufgrund schärfer werdender Festlegungen immer weiter zur Sicherheit verschieben kann (Ebel et al. 2010). Deshalb empfiehlt sich eine deutlichere tatsächliche Risikoreduzierung (siehe Abbildung 5).

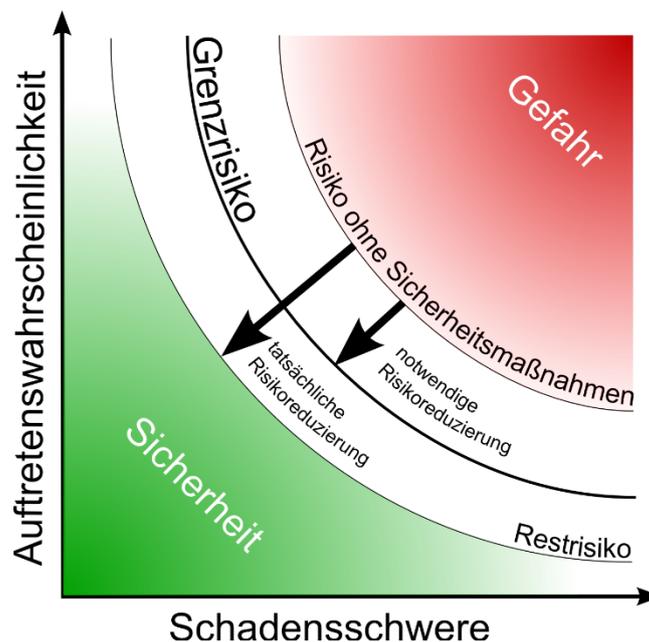


Abbildung 5: Absenkung des Risikos durch Sicherheitsmaßnahmen

Um die Sicherheit eines FAS zu bestimmen, muss zunächst das Risiko quantifiziert werden. Die Bewertung dieses Risikos erfolgt schon in frühen Entwicklungsphasen eines FAS in der sogenannten "Hazard Analysis and Risk Assessment" (ISO 26262-3 2009). Dort werden zur Absicherung elektrischer/elektronischer Fehler (e/e-Fehler) sogenannte

"Automotive Safety Integrity Levels" (ASIL) von A bis D bestimmt, die wiederum in Sicherheitsanforderungen für die weitere Produktentwicklung einfließen. Als Beispiel dürfen bei einem ASIL der Klasse D höchstens 10^{-8} nicht erkannte Fehler pro Betriebsstunde in einem Sensor auftreten (Weitzel 2013a).

Ein ASIL setzt sich zusammen aus Expositionswahrscheinlichkeit (E1-E4), Schadensschwere (S1-S3) und Kontrollierbarkeit (C1-C3), wie in der Bestimmungsmatrix in Tabelle 1 zu sehen.

Tabelle 1: ASIL Bestimmungsmatrix (ISO 26262-3 2011, S. 10)

		C1	C2	C3
S1	E1	QM	QM	QM
	E2	QM	QM	QM
	E3	QM	QM	A
	E4	QM	A	B
S2	E1	QM	QM	QM
	E2	QM	QM	A
	E3	QM	A	B
	E4	A	B	C
S3	E1	QM	QM	A
	E2	QM	A	B
	E3	A	B	C
	E4	B	C	D

Je nach Kombination resultiert ASIL A, B, C, D oder QM. QM steht dabei für Qualitätsmanagement und ist bei geringem Risiko ausreichend (Weitzel 2013a). Die Einteilung der Kontrollierbarkeitsstufen erfolgt anhand der in Tabelle 2 aufgeführten Kriterien.

Tabelle 2: Kontrollierbarkeitsstufen nach (ISO 26262-3 2011, S.9, vom Autor übersetzt)

Klasse	C0	C1	C2	C3
Beschreibung	generell kontrollierbar	leicht zu kontrollieren	normal zu kontrollieren	schwierig zu kontrollieren oder nicht kontrollierbar
Definition	generell kontrollierbar	$\geq 99\%$ oder mehr aller Fahrer oder anderer Verkehrsteilnehmer sind normalerweise in der Lage einen spezifischen Schaden abzuwenden	$\geq 90\%$	$< 90\%$

Beim Nachweis dieser Kontrollierbarkeitsstufen durch Probandenversuche eröffnen sich jedoch Fragen der effizienten Umsetzung. Für einen statistisch sauberen Nachweis der

Stufe C2 ergibt sich bei einem Konfidenzniveau von $\gamma = 95\%$ eine Mindeststichprobengröße von 29 Versuchspersonen (VPn), bei denen kein unkontrollierbares Ereignis auftritt. Geht man von nur einem auftretenden unkontrollierten Ereignis aus, erhöht sich das benötigte Kollektiv auf 46 Probanden. Für den Nachweis von C1 wären selbst bei keinem unkontrollierten Ereignis schon 299 VPn von Nöten (Weitzel und Winner 2012). Die Erfolgswahrscheinlichkeit in einer Stichprobe von 29 VPn kein unkontrolliertes Ereignis zu beobachten liegt nur bei 4,7%, sofern man von einem tatsächlichen Kontrollierbarkeitsanteil im Probandenkollektiv von 90%, wie in C2 gefordert, ausgeht. Selbst wenn ein tatsächlicher Kontrollierbarkeitsanteil im Probandenkollektiv von 99% bestünde, wäre die Chance ein unkontrolliertes Ereignis bei einer Stichprobe von 29 VPn zu finden noch größer als 25 %. Die Erfolgsaussicht bei 46 Probanden bei gleichem Kontrollierbarkeitsanteil höchstens ein unkontrollierbares Ereignis vorzufinden, liegt immerhin bei 92,3% (Weitzel 2013b). Aus diesem Grund wird vom RESPONSE Consortium (2009) im Code of Practice der erforderliche Kontrollierbarkeitsanteil für C2 auf 85% bei Probandenversuchen abgesenkt, was erfüllt wäre, wenn bei einer Stichprobe von 20 VPn kein einziges unkontrolliertes Ereignis aufträte (RESPONSE Consortium 2009, S. 15).

2.2 Der Begriff der Kontrollierbarkeit

Für den Begriff der "Kontrollierbarkeit" von FAS oder synonym dazu der "Beherrschbarkeit" existiert eine Vielzahl von Definitionen, die z.B. in (Weitzel 2013b, S. 5-7) oder (Neukum et al. 2013, S. 12-15) nachzulesen sind. Die dort aufgeführten Unterschiede sind intentionell marginal und beinhalten alle dieselbe Kernbotschaft:

Der Fahrer muss mit einem FAS sicher im Straßenverkehr agieren und möglicher Schaden abgewendet werden können.

Dabei herrscht Konsens, dass grundsätzlich sowohl der Fahrer als auch andere Verkehrsteilnehmer Schaden abwenden können (Fach et al. 2010; Weitzel und Winner 2012; Neukum et al. 2013; Ebel et al. 2010). Unterschiedlich sind allerdings die dabei betrachteten Situationen, die ursächlich zum Bereich der Kontrollierbarkeit gezählt werden. Die internationale Norm ISO 26262-1 betrachtet dabei lediglich technische Fehler elektrischer bzw. elektronischer Systeme (ISO 26262-1, 2011). Das bedeutet ein System agiert außerhalb seiner Spezifikation (vgl. Abbildung 6).

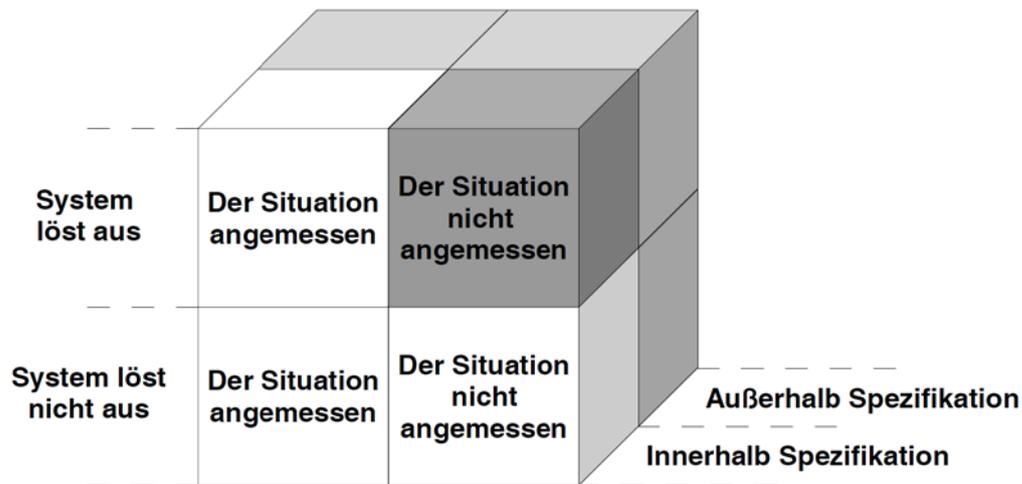


Abbildung 6: Klassifikation von Auslösungen von FAS (Weitzel 2013b, S. 5)

Im "RESPONSE Code of Practice" fallen unter Kontrollierbarkeit, zu den in der ISO-Norm betrachteten Systemfehlern, auch Systemgrenzen (RESPONSE Consortium 2009), die bei Ebel et al. (2010) als "funktionale Unzulänglichkeit" bezeichnet werden. Das sind System(-Nicht)-Auslösungen, die zwar innerhalb der Spezifikation liegen, also keinen technischen Fehler zur Grundlage haben, aber nicht situationsadäquat sind. Dazu zählen vor allem Falsch-Positiv-Auslösungen (vgl. Abbildung 6, System löst aus, der Situation nicht angemessen), aber auch Richtig-Negativ-Fälle, in denen das System z.B. aufgrund wetterbedingter schlechter Sensorsicht nicht auslöst, obwohl es der Situation angemessen wäre. Im Teilprojekt KON der Forschungsinitiative UR:BAN wird im Rahmen der Kontrollierbarkeit zusätzlich der Nutzenfall (vgl. Abbildung 6, der Situation angemessene Systemauslösung) bei eingreifenden Notfallfunktionen (vgl. Abbildung 4, Wirkweise C) und vorhersehbarer Fehlgebrauch betrachtet (Neukum et al. 2013). Fehlgebrauch kann ebenfalls der Ebene "außerhalb der Spezifikation" in Abbildung 6 zugeordnet werden, setzt aber voraus, dass der Fahrer nicht mit Vorsatz handelt und ist deshalb klar von Missbrauch abzugrenzen, der produkthaftungsrechtlich nicht abgesichert werden muss (Neukum et al. 2013, S. 26-27). Huesmann et al. (2015) verwenden den Begriff der "Gebrauchssicherheit", unter dem sie alle genannten kontrollierbarkeitsrelevanten Fälle summieren, die nicht durch technische Fehler (e/e-Fehler) entstehen und somit in den Bereich der ISO 26262 fallen würden.

2.3 Vorgehen zur Absicherung von Fahrerassistenzsystemen

Der Nachweis der Sicherheit von FAS ist kein einmaliges Ereignis kurz vor Markteinführung sondern begleitet den gesamten Entwicklungsprozess (vgl. Maurer 2012). In der ISO 26262-3 wird dieser Vorgang anhand des V-Modells visualisiert, das z.B. in Maurer (2012) vorgestellt wird (ISO 26262-3 2011, S.3). Ob die Entwicklung von FAS in der Praxis anhand dieses Modells vollzogen wird, sei an dieser Stelle dahin gestellt (vgl. Maurer 2012, S. 45), wesentlich ist die frühzeitige Integration von Sicherheitsbewertungen in den Entwicklungszyklus von FAS (Fach et al. 2010, S. 1). Speziell bei der Entwicklung neuartiger FAS empfiehlt sich eine frühzeitige Betrachtung der Kontrollierbarkeit (vgl. Abbildung 7). Bereits in der Konzeptphase werden aufgrund der gemäß ISO 26262-3 durchgeführten "Hazard analysis and risk assessment" umfassend Gefahren identifiziert und mit einem potentiellen Risiko belegt. Aus diesen Daten und aufgrund Analysen von Unfall- oder Field Operational Test (FOT)-Daten können Testfälle abgeleitet werden, die kontrollierbarkeitsrelevante Fragestellungen zur Auslegung des FAS beinhalten (vgl. Weitzel und Winner 2012).

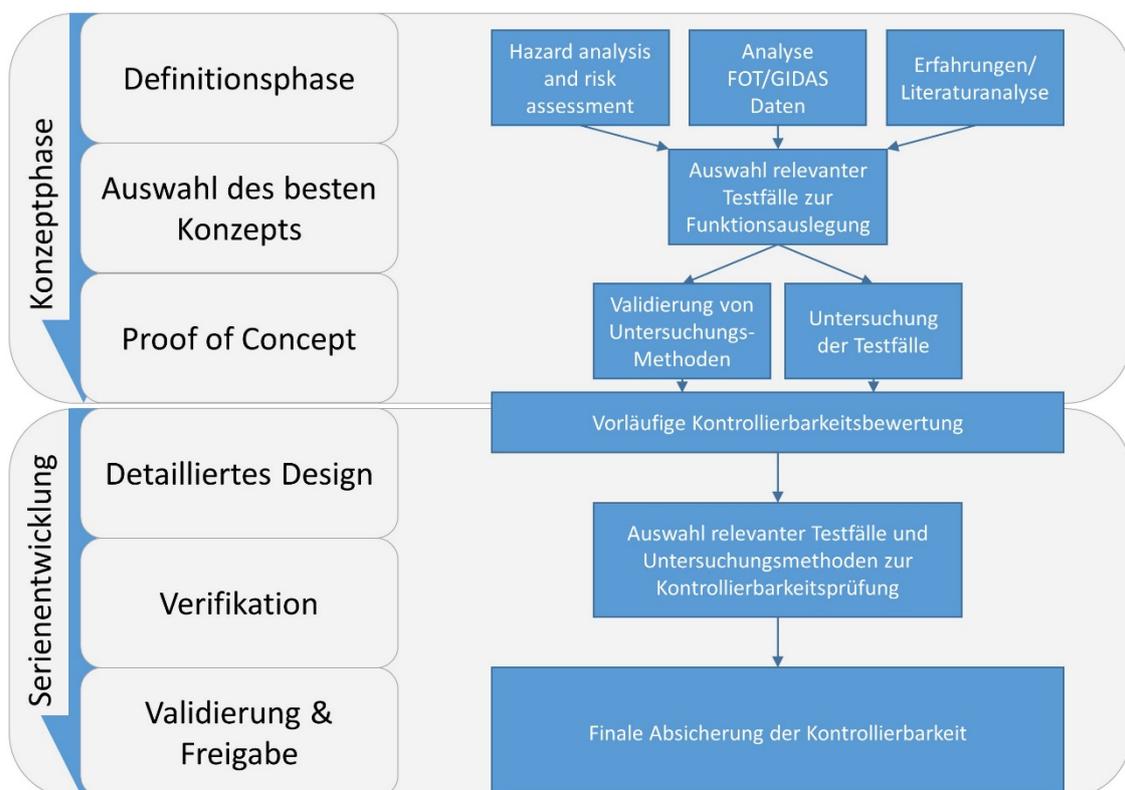


Abbildung 7: Vorgehen zur Kontrollierbarkeitsbewertung bei der FAS-Entwicklung

Letztere können aber evtl. schon durch Literaturanalysen oder Erfahrungen aus anderen FAS-Entwicklungen beantwortet oder auch ergänzt werden. Die gesammelten Testfälle

müssen nun noch nach ihrer Relevanz beurteilt werden. Ein Verfahren dazu hat Weitzel (2013b) vorgestellt. Um die relevanten Testfälle zu untersuchen, werden Methoden benötigt, die teilweise noch entwickelt werden müssen. Dies geschieht in der Konzeptphase, damit für die finale Kontrollierbarkeitsbewertung valide Methoden vorhanden sind (vgl. Neukum et al. 2013). Die Aussagekraft dieser frühen Studien ist dabei nicht zu unterschätzen. In Winner et al. (2003) wird aufgezeigt, dass bei ACC-Versuchen weltweit sehr ähnliche Ergebnisse vorzufinden sind, obwohl die getesteten Funktionen unterschiedlicher Güte waren. Gleiches lässt sich aus diversen Publikationen zu ANB-Systemen schließen (vgl. Shutko 1999; Unselt et al. 2004; Kirchner et al. 2005; Färber und Maurer 2005; Fuchs et al. 2008; Fecher et al. 2009; Sommer und Engeln 2009; Kobiela 2011, Kobiela und Engeln 2010, 2010, 2010; Itoh et al. 2011; Färber 2015).

Bevor in Kapitel 3 derartige Methoden vorgestellt werden, die auch in frühen konzeptionellen Phasen Anforderungen an die FAS-Absicherung erfüllen können, muss zunächst geklärt werden, welche Maßnahmen für welche Art von Assistenzsystem (vgl. Kapitel 2) von Nöten sind. Dazu bietet sich die auf Seite 8 vorgestellte juristisch bindende Einteilung nach Gasser (2014) an.

2.3.1 Absicherung von Fahrerassistenzsystemen der Wirkweisen A und B

Für informierende bzw. warnende Systeme (Wirkweise A) ist die Hauptgefahr eine Überlastung oder zu starke Ablenkung des Fahrers von der Fahraufgabe. Deshalb empfiehlt sich während des Entwicklungsprozesses oft die Gestaltung anhand bestehender Normen zur Mensch-Maschine-Interaktion, sogenannter HMI-Guidelines (Carsten und Nilsson 2001). Beispiele dafür sind die "PROMETHEUS MMI Checklist" (Nilsson und Alm 1991), das "European Statement of Principles on Human Machine Interface" (Commission of the European Union 2006) oder die "Checklist for the assessment of in-Vehicle information systems" (Stevens und Cynk 2011). Der "RESPONSE Code of Practice" (2009) enthält ebenfalls Checklisten, anhand derer ein solches System abgesichert werden kann. Final sollte die Gebrauchssicherheit informierender bzw. warnender Systeme empirisch belegt werden (Carsten und Nilsson 2001). Untersuchungen im Themenfeld von Kollisionswarnungen sind beispielsweise in Häring et al. (2009), Unselt et al. (2011), Naujoks et al. (2012) oder Ovcharova et al. (2012) zu finden. Im Bereich der haptischen Lenkempfehlungen sind Arbeiten u.a. von Kleen und Schmidt (2009) oder Sieber et al. (2013) publiziert.

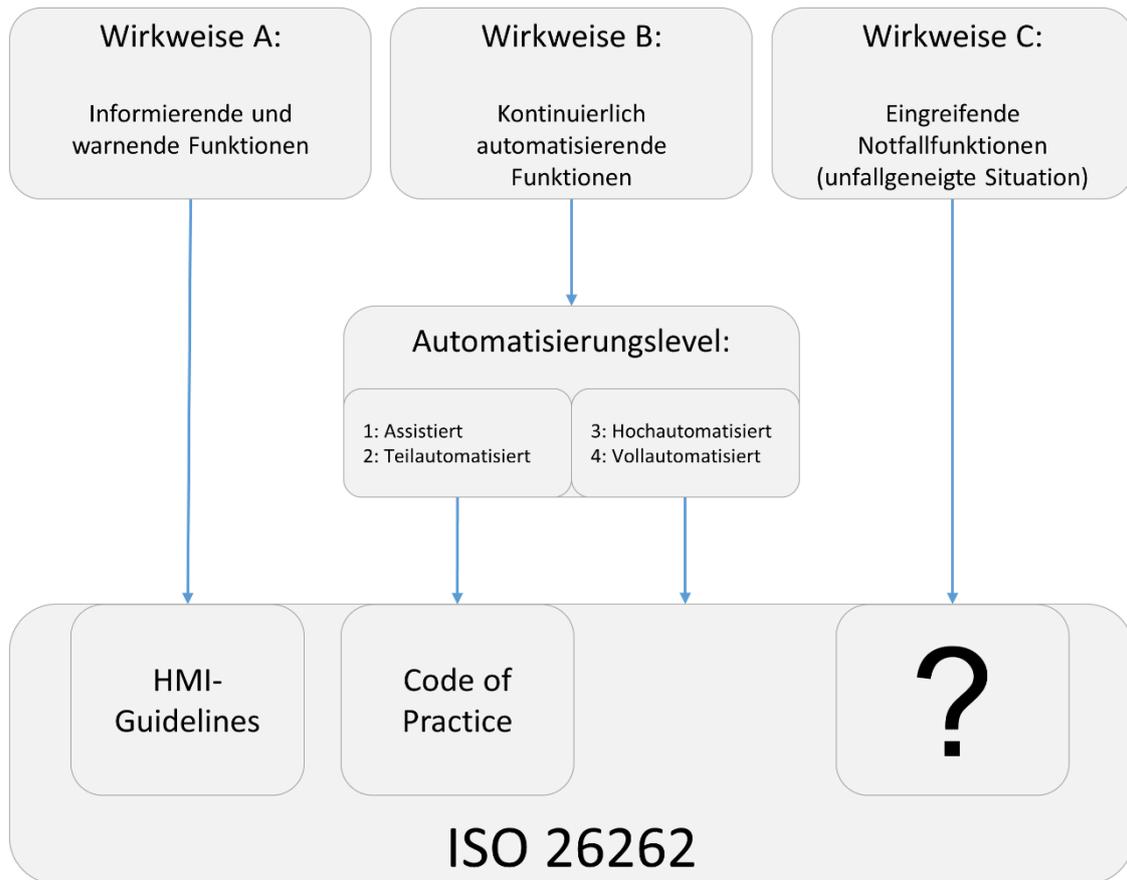


Abbildung 8: Leitfäden zur Absicherung verschiedener FAS vor dem Hintergrund der ISO 26262

Für FAS, die kontinuierlich in die Fahrzeugführung eingreifen (Wirkweise B), fällt der Nachweis differenzierter aus (vgl. Abbildung 8). Zunächst muss geklärt werden, in welcher Automatisierungsstufe gemäß der Einteilung von Gasser (2014) sich ein FAS einreicht (vgl. Abbildung 4, rechts). Ab der Stufe "Hochautomatisiert" ist der sichere Betrieb eines Systems, z.B. eine zuverlässige Funktionsweise oder die Überführung in einen sicheren Zustand bei Ausfall von Systemkomponenten, Bestandteil der Funktionalen Sicherheit (FuSi). Somit ist die Sicherheit gemäß ISO 26262 nachzuweisen. Der Fahrer dient nur noch als Rückfallebene mit gewisser Zeitreserve. Nur in diesem Fall und beim Aktivieren bzw. Deaktivieren der Funktion muss eine sichere Übergabe an bzw. Übernahme der Fahrzeugführung durch den Fahrer gewährleistet werden (Carsten und Nilsson 2001). Da derartige Systeme technisch jedoch noch weit von einem Serienzustand entfernt sind, existieren zwar bereits Forschungsergebnisse (z.B. Damböck et al. 2012; Wilmsen et al. 2014) aber noch keine bindenden Richtlinien für solche Szenarien.

Unterhalb dieses Automatisierungsgrades bis "Teilautomatisiert" bildet der Fahrer die ständige Rückfallebene und muss jederzeit die Fahrzeugführung, wenn nötig auch durch

Übersteuerung des Systems übernehmen können (Gasser 2012). Da auch hier HMI-Aspekte wie das Systemverständnis nicht außer Acht gelassen werden dürfen, wirft dies vor allem an den funktionalen Grenzen bzw. Unzulänglichkeiten und bei Fehlern des Assistenzsystems Fragen der Gebrauchssicherheit auf (Carsten und Nilsson 2001), die unter dem Begriff "Kontrollierbarkeit" von Fahrerassistenzsystemen subsumiert werden (vgl. Kapitel 2.2). Auch in diesem Fall existieren neben der ISO 26262 Leitfäden zum Nachweis der Sicherheit wie der schon genannte "RESPONSE Code of Practice" (RESPONSE Consortium 2009).

Typische bereits auf dem Markt befindliche Systeme dieser Wirkweise sind Spurhalteassistenten oder ACC. Auf diesem Gebiet liegt auch eine Vielzahl an empirischen Ergebnissen zu Fahrerverhalten bei Systemfehlern oder an funktionalen Grenzen vor. Im Bereich der Längsführung untersuchten Schmitt et al. (2006) und (Neukum et al. 2008a) wie Fahrer auf die Systemgrenze "stehendes Hindernis" bei ACC Stop&Go reagieren. In diesem Szenario regelte das ACC auf ein vorrausfahrendes Fahrzeug, das kurz vor einer Kreuzung den Fahrstreifen wechselte. Davor befand sich jedoch ein stehendes Fahrzeug. Obwohl das ACC dieses Hindernis nicht detektierte und deshalb beschleunigte, waren keine unkontrollierbaren Ereignisse festzustellen (Schmitt et al. 2006; Neukum et al. 2008a). Bei Schmitt et al. (2006) wurden zusätzlich naheinscherende Fahrzeuge als Systemgrenze und bei Niederée und Vollrath (2009) sowie Schmitt et al. (2006) plötzliche Systemausfälle evaluiert. Eine umfangreiche Felduntersuchung zu fast allen genannten Aspekten liefern Fancher et al. (1998).

Zur Fahrzeugquerführung existieren ebenfalls Untersuchungen zu Systemgrenzen bzw. plötzlichem Systemausfall (vgl. Blaschke et al. 2009; Tönert et al. 2011). Der Hauptfokus der Kontrollierbarkeitsstudien zur Querführungsassistenz liegt allerdings bei fehlerhaften Eingriffen in die Lenkung (vgl. Jamson et al. 2005; Neukum und Krüger 2003; Neukum und Reinelt 2005; Neukum et al. 2010b; Schmidt 2008b, 2008a, 2009; Neukum et al. 2008b). Hier wurde von Neukum et al. (2010a) zudem der Einfluss des Fahrzeuges auf fehlerhafte Lenkmomentaufschaltungen untersucht, wo sich die Gierrate als gute, fahrzeugunabhängige Vergleichsgröße herausstellte (Neukum et al. 2010a).

Für alle Arten der kontinuierlich wirkenden Assistenzsysteme wurden zudem Studien zu möglichen negativen Verhaltensanpassungen bzw. übertriebenem Systemvertrauen nach längerer Nutzungszeit erhoben (Weinberger 2001; Buld et al. 2002; Popken 2009; Blaschke et al. 2009). Diese Aspekte werden auch von Färber (2015) diskutiert, wobei

auf die Problematik der oft unklaren Verantwortungszuteilung zwischen Fahrer und System durch zu intelligent wirkende Assistenz hingewiesen wird (vgl. dazu auch Niederée und Vollrath 2009).

2.3.2 Absicherung von Systemen der Wirkweise C

Bei Systemen der Wirkweise C handelt es sich um Notfall-FAS, die kurzzeitig autonom ins Fahrgeschehen eingreifen, um eine drohende Kollision zu verhindern oder in ihrer Schwere abzumildern. Darunter fallen Notbremssysteme oder Ausweichassistenzsysteme. Die geringen Zeiten bis zu einem möglichen Aufprall in Fahrsituationen, die ein Notfall-FAS erfordern, bedingen Eingriffe mit Intensitäten weit über denen eines kontinuierlich wirkenden Systems (vgl. Winner 2012). Die Ursache für solche "harten" Eingriffe sind häufig nicht vorhersehbare Situationsentwicklungen oder abgelenkte Fahrer (Färber und Maurer 2005). Entsprechend überraschend ist z.B. eine ANB-Auslösung für den Fahrer und er reagiert darauf erschrocken, bisweilen sogar angstvoll/panisch (vgl. Färber und Maurer 2005). Dies kann wiederum fehlerhafte Handlungen hervorrufen wie beispielsweise das Verwechseln von Fahr- und Bremspedal (vgl. auch Sommer und Engeln 2009; Kobiela und Engeln 2010; Färber 2015; Bender et al. 2007b). Aus diesem Grund müssen bei Notfall-FAS nicht nur funktionale Unzulänglichkeiten bzw. Systemfehler untersucht werden, sondern auch der Nutzenfall und die anschließende Übernahme durch den Fahrer (Neukum et al. 2013, S. 15; Färber und Maurer 2005; Färber 2015). Doch eine potentielle Gefährdung besteht bei FAS der Wirkweise C nicht nur für den Fahrer selbst. Sie tangiert auch andere Verkehrsteilnehmer, z.B. den Folgeverkehr bei ANB-Auslösungen, weshalb auch diese Dimension bei der Einstufung der Kontrollierbarkeit beachtet werden muss (Fach et al. 2010; Färber und Maurer 2005; Neukum et al. 2014). Wie in Abbildung 8 angedeutet, sind die vorliegenden Leitfäden nicht gänzlich für die Evaluation von Notfall-Assistenz-Systemen geeignet oder weisen für diese speziellen Fälle Lücken auf (Schick et al. 2007, S. 415).

Existierende Literaturbefunde:

Bisweilen liegen aber zumindest für die Einstufung der Kontrollierbarkeit von ANB-Systemen vor dem Hintergrund der ISO 26262 bereits zahlreiche Einzel-Publikationen vor, obgleich eine detaillierte Richtlinie oder feste Standards nicht darunter sind. Die Arbeiten von Färber und Maurer (2005), Bender et al. (2007b), Fuchs et al. (2008), Fecher et al. (2009), Sommer und Engeln (2009), Fach et al. (2010), Breyer et al. (2010) und Kobiela

(2011) beinhalten Untersuchungen zu autonomen Notbremsmanövern, sowohl zu berechtigten, als auch zu Falschauslösungen. In Fecher et al. (2009) und Breyer et al. (2010) werden unterschiedlich intensive Bremsfunktionen untersucht, wobei zum einen die Verzögerungsstärke (Fecher et al. 2009), zum anderen der Verlauf des Bremsprofils variiert wurde (Breyer et al. 2010). Es zeigt sich, dass schwächere Eingriffe und Eingriffe mit leichten Rampen zu Beginn und Ende der Bremsung gleiche Wirksamkeit im Nutzenfall besitzen wie harte bzw. sprungförmig ansteigende/abfallende Verzögerungsprofile. Bei Falschauslösungen ergeben sich bei diesen gerampten Profilen jedoch deutliche Vorteile gegenüber den sprungförmigen (vgl. Fecher et al. 2009, S.; Breyer et al. 2010).

In Sommer und Engeln (2009), Kobiela und Engeln (2010), Kobiela (2011) und (Färber 2015) wird versucht anhand von Fahrerreaktionen auf deren Intention zu schließen und einen Übersteuerungsklassifikator zu finden. Färber und Maurer (2005), Fuchs et al. (2008) sowie Kobiela (2011) beleuchten die Fahrerreaktion von psychophysiologischer Seite. Es zeigt sich, dass vor allem der Erstkontakt mit einem Notbremssystem starke körperliche Reaktionen hervorruft, die von geweiteten Pupillen über starke Muskelanspannung bis zu erhöhter Herzschlagfrequenz reichen (Färber und Maurer 2005; Fuchs et al. 2008; Kobiela 2011). Wie bereits erwähnt, erfordern FAS der Kategorie C auch eine Absicherung aus Sicht anderer Verkehrsteilnehmer. Dazu wurden zum einen Simulationen (Färber und Maurer 2005; Fach et al. 2010), aber auch Feldstudien durchgeführt (Neukum et al. 2014).

Deutlich unterschiedlich ist dagegen die Literaturlage zu Notfall-FAS mit Eingriffen in die Querführung. Das erste relevante FAS in diesem Bereich entstand mit dem PRO-RETA-Projekt von 2002 bis 2006 an der TU Darmstadt, wobei die dazu publizierten Untersuchungen keine Kontrollierbarkeitsaspekte adressierten (Bender et al. 2007a, 2007b; Isermann et al. 2012). Ähnliche Systeme, ebenfalls aber ohne veröffentlichte Kontrollierbarkeitsuntersuchungen, sind von Bosch (Fausten 2010), Continental (Hartmann et al. 2009; Eckert et al. 2011) und Daimler bekannt (Dang et al. 2012). Kleen und Schmidt (2009) und Sieber et al. (2013) betrachteten einseitig gerichtete Lenkmomente als Ausweichempfehlungen, auch unter Kontrollierbarkeitsaspekten. Dabei zeigte sich, dass Signale in den Lenkmoment-Bereichen, die auch bei kontinuierlichen FAS der Wirkweise B schon evaluiert wurden, auch in kritischen Situationen vom Fahrer beherrschbar sind (Kleen und Schmidt 2009). Automatische Ausweichfunktionen, die den Fahrer auf einer Idealtrajektorie um ein Hindernis lenken sollen, wurden von Hesse et al. (2013) sowie

Pütz et al. (2014a; 2014c) auf Kontrollierbarkeit im Nutzenfall wie auch bei Falschauslösungen bewertet. Pütz et al. (2014b) betrachten zudem den vorhandenen Verkehrsraum als Variable, in Heesen et al. (2015) werden verschiedene Vorankündigungen zur Verbesserung der Wirksamkeit und Kontrollierbarkeit untersucht. Zudem wird eine völlige Entkopplung des Fahrers während des Lenkeingriffs durch eine Steer-By-Wire-Lenkung mit einer klassischen nicht entkoppelten Lenkung verglichen, an der das Lenkmoment vollständig anliegt und dem Fahrer rückgemeldet wird (Heesen et al. 2015). Die anliegenden Lenkmomente für automatische Ausweichmanöver sind in allen Untersuchungen deutlich über den als beherrschbar erachteten Momenten bei kontinuierlich regelnden FAS. Zunächst stellt sich heraus, dass der Fahrer bei nicht entkoppelter Lenkung ein stark dämpfendes Element in der Regelkette bildet und damit die Wirksamkeit drücken kann (Hesse et al. 2013; Pütz et al. 2014c). Letztere ist bei entkoppelter Lenkung sehr hoch. Bei Falschauslösungen kann der Fahrer aktuelle Systeme dieser Art aber nicht beherrschen (Heesen et al. 2015). Bessere Ergebnisse erzielen dabei Systeme mit nicht entkoppelter Lenkung (Pütz et al. 2014a), wobei haptische Vorankündigungen hier noch weitere Verbesserung der Kontrollierbarkeit versprechen (Hesse et al. 2013).

2.3.3 Intendierte Funktionseinschränkung von FAS

Die bewusste Verschlechterung von FAS-Funktionen mag sich aus technischer Sicht zunächst unsinnig anhören, ist aber ein probates Mittel zur Verbesserung der Kontrollierbarkeit (Ebel et al. 2010; Färber 2015). Bei der Ausschöpfung der Aktopotentiale zur Umsetzung einer FAS-Funktion empfiehlt es sich häufig, nicht das Maximum auszunutzen. Eine Notbremsung mit voller Intensitäts-Ausreizung bewirkt gleichzeitig eine erhöhte Gefahr durch Auffahrunfälle des Folgeverkehrs, weshalb eine Begrenzung sinnvoll ist (Färber und Maurer 2005). Bei Fecher et al. (2009) zeigte sich beispielsweise, dass ein Teilverzögerungseingriff bei LKW im Nutzenfall ähnliche Wirksamkeit wie ein Vollverzögerungseingriff erzielte, bei Falschauslösungen aber weit geringere Störungsmaße initiierte. Auch ein zeitliches Limit für Eingriffe kann eine ähnliche Wirkung erzeugen. Erfolgt diese Einschränkung möglichst nah am Akteur, also im genannten Beispiel am Steuergerät der Bremse, bezeichnet man das als "Dekomposition" (Ebel et al. 2010). Diese Maßnahme hat nicht nur eine Erhöhung der Kontrollierbarkeit im Nutzenfall, sondern gleichzeitig auch im Fehlerfall bzw. bei Falschauslösungen zur Folge, die dadurch ebenfalls in ihrer Intensität beschränkt sind (Ebel et al. 2010).

Eine andere Argumentation, die ebenfalls für eine absichtlich herbeigeführte Systemverschlechterung spricht, führen Niederée und Vollrath (2009) und Färber (2015) an. Dort wird das steigende Systemvertrauen der Fahrer bei zunehmender Automation und Güte einer Funktion adressiert. Je weniger Fehler einem FAS unterlaufen, desto länger werden die Reaktionszeiten bei plötzlichen Ausfällen oder an Systemgrenzen (Niederée und Vollrath 2009). Auch die Verantwortungszuteilung kann unklar werden, wenn Systeme laut innerem Modell des Fahrers eine Fahrsituation eigentlich meistern sollten, aber es dann doch nicht schaffen. Das kann passieren, wenn FAS Grenzen besitzen, die ein Laie schwer nachvollziehen kann (Färber 2015). Als Beispiel dafür nennt Färber (2015) die Anfahrtsüberwachung bei ACC Stop&Go. Ausgegangen wird von einer Funktion, die Fußgänger erkennt und dann nicht anfährt. Erlebt der Fahrer ein solches funktionierendes System, ist seine Reaktionszeit umso länger, wenn die Assistenz einen Fußgänger doch einmal nicht erkennt und fälschlicherweise anfährt. Deshalb empfiehlt Färber (2015) das System auch bei erkannten Fußgängern immer anfahren zu lassen, wenn auch mit verringerter Dynamik, was die Verantwortung des Handelns klar beim Fahrer belässt und somit zu kürzeren Reaktionszeiten führt. Daraus lässt sich ableiten, dass die künstliche Verschlechterung von Assistenzsystemen zu klaren Grenzen und verbessertem Systemverständnis sowie erhöhter Daueraufmerksamkeit beim Fahrer führen kann. Deshalb sollten Systeme, solange sie nicht ausgereift sind und somit vollautomatisch agieren können, keine technische Optimierung, sondern eine verständliche Auslegung in einem klar abgegrenzten Funktionsbereich anstreben (Niederée und Vollrath 2009; Färber 2015).

3 Aspekte einer validen Kontrollierbarkeitsprüfung

Laut RESPONSE Code of Practice bestehen drei mögliche Zugänge zur finalen Kontrollierbarkeitsbewertung eines FAS (RESPONSE Consortium 2009):

1. Bewertung durch ein interdisziplinäres Expertenteam
2. Auswertung von Probandenversuchen mit naiven Testpersonen
3. Direkte Empfehlung der Freigabe durch das Entwicklerteam

Für den Nachweis der Kontrollierbarkeitsstufe C1 wurde das Dilemma der benötigten Stichprobengrößen bereits in Kapitel 2.1 erläutert. Deshalb empfehlen Fach et al. (2010) den Nachweis von C2 mit Probandenversuchen und eine Hochstufung auf C1 durch ein Expertenteam. Dieses Team sollte sowohl Entwickler, als auch externe Spezialisten aus der funktionalen Sicherheit, der Produkthaftung oder Human-Factors-Disziplinen umfassen (RESPONSE Consortium 2009, S. 14). Um aber eine finale Bewertung durchführen zu können, müssen, falls noch nicht vorhanden, zunächst Methoden bereitgestellt werden, mit denen diese Prüfung stattfinden kann. Diese sollten schon gemeinsam mit dem System in der Konzeptphase entwickelt werden, um für die finale Prüfung etabliert zu sein. Da vor allem bei FAS der Wirkweise C massive Eingriffe ins Fahrzeug stattfinden können, empfiehlt es sich ein solches System mit Probandenversuchen abzusichern. Solche Untersuchungen besitzen wiederum nur eine Aussagekraft, wenn gewisse Aspekte im Versuchsdesign beachtet werden (Breuer 2003). Deshalb liegt hier der Fokus der weiterführenden Betrachtungen. Was bei direkter Freigabe eines FAS durch das Entwicklerteam zu beachten ist, kann im Code of Practice (RESPONSE Consortium 2009) auf Seite 15 nachgelesen werden, Details zur Evaluation durch Expertenteams sind in derselben Quelle auf Seite 14 und im Anhang B.4 enthalten.

3.1 Versuchsdesign

Fahrversuche mit Probanden sind häufig mit hohem Aufwand verbunden, aber meist unumgänglich, wenn objektive Aussagen getroffen werden sollen (Engeln 2003). Um dennoch möglichst effizient testen zu können, wäre es wünschenswert, mehrere Prüfziele in einem einzigen Versuch berücksichtigen zu können (vgl. Fecher et al. 2008). Zu viele Fragestellungen in einem Versuch zu betrachten, birgt allerdings das Risiko, trotz aufwändiger Versuche keine belastbaren Aussagen treffen zu können (Engeln 2003). Deshalb ist das Versuchsdesign von entscheidender Bedeutung für den Erfolg einer Fahrstudie. Die beinhaltet nicht nur die Auswahl der Testfälle und Pass-/Fail-Kriterien, entsprechender Stichproben und des daraus resultierenden Versuchsplans, sondern auch Aspekte des gewählten Versuchsaufbaus inklusive Prüfumgebungen und Messverfahren sowie optimierten Versuchsabläufen, wie sie im Folgenden dargestellt werden.

3.1.1 Auswahl von Testfällen

Im Laufe eines Fahrzeuglebens werden einem FAS unzählige Fahrsituationen begegnen, die in ihrer Fülle vor Markteinführung niemals vollständig getestet werden können. Deshalb ist es von großer Bedeutung, die richtigen Testfälle zur Absicherung auszuwählen, um einerseits effizient zu prüfen, andererseits belastbare Aussagen treffen zu können (Weitzel und Winner 2012). Im RESPONSE Code of Practice werden möglichst kritische Situationen mit hoher Relevanz für die Kontrollierbarkeit vorgeschlagen, jedoch nicht weiter präzisiert (RESPONSE Consortium 2009, S. 13).

Ansätze zur systematischen Generierung und Beschreibung von Fahrszenarien im Allgemeinen sind bereits bekannt (z.B. Domsch und Negele 2008; Purucker 2013). In den EU-Projekten ASTE (Dukic et al. 2007) und dessen Nachfolger eVALUE (Zlocki et al. 2008) wurde ein mögliches Verfahren aufgezeigt, wie daraus relevante Testfälle extrahiert werden können. Dort wurden Testfälle aus Unfalldaten abgeleitet, die eine vergleichbare Bewertung von Sicherheitsfunktionen ermöglichen sollen (Zlocki et al. 2008). Dabei entstanden jeweils unterschiedliche Testszenarien für Längs-, Querfunktionen und Funktionen der Stabilisierungsebene. Ein Verfahren, das von kombinatorisch möglichen Kollisionsszenarien von zwei Fahrzeugen im Längsverkehr, an Kreuzungen und bei Fahrstreifenwechsel ausgeht, wird bei Fecher et al. (2008) aufgeführt. Die Relevanz und Auswahl wird hier über mögliche Einflussparameter auf das FAS präzisiert. Testfälle mit hoher

Schadensschwere leiten sich auch aus der Hazard and Risk Analysis gemäß ISO 26262 ab (Weitzel 2013a). Diese besitzen - auch wenn sie nur sehr selten auftreten - eine hohe Relevanz für die Absicherung von FAS (vgl. Kapitel 2.1). Zu beachten ist aber, dass ein Testfall für die Kontrollierbarkeitsuntersuchung eine realistische Möglichkeit zur Entschärfung durch den Fahrer enthalten muss. Sollte z.B. die benötigte Brems-Reaktionszeit zur Entschärfung unter den üblichen Werten bei einer Gefahrenbremsung (z.B. Schmitt et al. 2007) liegen, kann auch ohne Generierung und Überprüfung eines Testfalls davon ausgegangen werden, dass die Situation nicht kontrollierbar ist.

Die ISO-Norm 26262 misst aber relevanten Testfällen auch den Faktor Auftretenswahrscheinlichkeit bei. Eine Möglichkeit diese zu ermitteln, liefern virtuelle bzw. simulationsgestützte Verfahren. Das Einbinden von FAS in Verkehrssimulationen kann in Dauertläufen Aufschlüsse über kritische Situationen bieten (vgl. Breuer und Christen 2002). Aber auch das Einbinden von Soft- oder Hardware in Simulationsumgebungen kann Systemgrenzen und Situationen mit hoher Fehlerexposition aufdecken (vgl. Strasser et al. 2010; Langnickel und Schadeck 2010; Ganslmeier et al. 2010). Fundierte Zugänge zur Überprüfung von Auftretenswahrscheinlichkeiten von Testfällen im Realverkehr liefern Daten aus Langzeitstudien, sogenannten "Field Operational Tests" (FOT) oder "Naturalistic Driving Studies" (NDS) wie z.B. in Neale et al. (2005) oder Benminoun et al. (2014) beschrieben. Weitzel (2013b) entwickelt in seiner Dissertation ein Verfahren, in dem einzelne Situationsparameter mit Auftretenswahrscheinlichkeiten aus Literaturbefunden belegt werden. Unter der Voraussetzung, dass diese voneinander unabhängig sind, lassen sich so unterschiedliche Parameter kombinieren und die Wahrscheinlichkeit der Exposition, ebenso wie die Relevanz für die Kontrollierbarkeitsprüfung bestimmen (Weitzel 2013b). Entsprechend der daraus abgeleiteten essentiellen Parameter ergibt sich der nötige Detaillierungsgrad eines Testfalls. Dieser kann aufgrund von Einschränkungen der Prüfungsumgebung oft nicht eingehalten werden (vgl. Kapitel 3.2), weshalb es gängige Praxis ist, den Detaillierungsgrad auf das machbare Minimum zu abstrahieren (Weitzel und Winner 2012). Dabei können auch Kontrollierbarkeitsanalogien behilflich sein (Weitzel 2013b, S. 50-51; RESPONSE Consortium 2009, S. 14). Das bedeutet, dass es zulässig ist, bei bestimmten Testfällen, in denen der Fahrer auf bekannte Reaktionsmuster aus entsprechenden alltäglichen Fahrsituationen zurückgreifen kann, die Kontrollierbarkeit vergleichend einzuschätzen. Konsequenterweise können mit diesem Verfahren Einflüsse von Parametern abgeschätzt und der Detailgrad des Testfalls reduziert werden. Eine weitere Vorauswahl relevanter Testfälle kann durch Experten erfolgen. Dies geschieht in der

Regel in Voruntersuchungen, die eine gute Abschätzung des potentiellen Einflusses von Parametern und Fahrerreaktionen zulassen (Neukum et al. 2013, S. 48).

3.1.2 Geeignete Pass-/Fail-Kriterien

Für den finalen Beherrschbarkeitsnachweis eines FAS vor der Freigabe sind geeignete, binäre Pass-/Fail-Kriterien festzulegen (RESPONSE Consortium 2009, S. A50). Doch auch zur frühzeitigen Einschätzung der Beherrschbarkeit im Sinne der ISO 26262 braucht es feste Kriterien zur Einstufung der Kontrollierbarkeit. Im RESPONSE Code of Practice wird dazu vorgeschlagen, dass Systemingenieure einem Human-Factors-Team die genauen FAS-Funktionen und die relevanten Testfälle erläutern. Mit Hilfe der Human-Factors-Spezialisten sollen auf dieser Basis absehbare Fahrerreaktionen bestimmt und Grenzwerte für die Beherrschbarkeit identifiziert werden. Welche Variablen aber zur Bestimmung herangezogen werden sollen, wird nicht betrachtet (RESPONSE Consortium 2009 Anhang B3). In eVALUE wurde eine Liste mit solchen Variablen publiziert, die für spezifische Testfälle eine Indikation über die Sicherheit von FAS liefern sollen (Zlocki et al. 2008, S. 14). Da die dort betrachteten Testfälle aber eher zu objektiven Vergleichszwecken von FAS verschiedener Hersteller - ähnlich zu Euro NCAP (vgl. Euro NCAP 2015) - dienen sollen, werden keine Grenzwerte zur Beherrschbarkeit festgelegt und auch ausschließlich Fahrzeugbewegungsgrößen als Variablen betrachtet. Neben solchen objektiven Fahrzeugparametern erfassen fast alle Kontrollierbarkeitsuntersuchungen zusätzlich noch subjektive Bewertungen (z.B. Neukum und Krüger 2003; Schmitt et al. 2006; Fuchs et al. 2008; Kobiela und Engeln 2010; Neukum et al. 2008b) oder physiologische Kennwerte (z.B. Färber und Maurer 2005; Fuchs et al. 2008; Fecher et al. 2009; Kobiela 2011). Eine ausführliche Abhandlung über Pass-/Fail-Kriterien ist in Neukum et al. (2013, S. 48-54), eine Bewertung der einzelnen Verfahren über deren Eignung in Bruder et al. (2009) zu finden. Im Folgenden sollen die wichtigsten Pass-/Fail-Kriterien aus empirischen Befunden zusammengetragen werden:

Physiologische Messungen:

Physiologische Maße wie Herzfrequenz, Hautleitwert oder Blickbewegungen wie in Fuchs et al. (2008) sind oft in der Erhebung aufwändig und deren Interpretationsfähigkeit unspezifisch, da nicht trennscharf zwischen Güte der Aufgabenbewältigung und anforderungsabhängiger Aktivierung unterschieden werden kann. Deshalb sind physiologische

Messwerte allein kein geeignetes Pass-/Fail-Kriterium, können aber zur Verifikation oder Unterstützung von Subjektivurteilen herangezogen werden (Neukum et al. 2013, S. 54).

Objektive Variablen:

Das einfachste Kriterium der objektiven Variablen ist sicherlich ein Unfallereignis bzw. Ereignisse, die außerhalb der Prüfumstände zu Unfällen geführt hätten, wie beispielsweise das Verlassen der Fahrbahn. Dieses Kriterium wurde z.B. bei Fach et al. (2010), Eckert et al. (2011) oder Heesen et al. (2015) angesetzt. Bei Fecher et al. (2008) konnte die Prüfumgebung durch rechtzeitiges Entfernen des Kollisionsobjektes einen Unfall verhindern, bei Neukum et al. (2008a) und Neukum et al. (2014) geschah dies durch den Eingriff eines Versuchsleiters mit Fahrschulpedalerie. Da ein (Beinahe-)Unfall in empirischen Untersuchungen aufgrund der Prüfbedingungen nicht immer zu tolerieren ist, können auch andere Kriterien herangezogen werden. In Fach et al. (2010) wird daher z.B. über Expertenbewertungen eine Klassifikation von Störgeräten nach ISO 26262 (C0 - C3), abhängig von der gefahrenen Geschwindigkeit, festgelegt. Für dieselbe Variable fanden Neukum et al. (2008b) bei zusätzlicher Betrachtung typischer Fahrbahnbreiten je nach gefahrener Geschwindigkeit über Probandenversuche ein zulässiges Maximum. Methodisch wurden die Grenzwerte über subjektive Bewertungen von knapp 100 Versuchspersonen ermittelt. Für eine Geschwindigkeit von 50 km/h bei 2.5 m Fahrbahnbreite sind demnach Störgeräten unter 4°/s beherrschbar (Neukum et al. 2008b).

Subjektiv-Urteile:

Bei richtigem Einsatz können Beurteilungsinstrumentarien wie die Toleranzskalen nach Neukum und Krüger (2003) bzw. Neukum et al. (2008a), die in Abbildung 9 dargestellt sind, einen guten methodischen Zugang zu einem Pass-/Fail-Kriterium liefern. In diesen Skalen werden Fahrer nach dem Empfinden einer Störung oder Fahrsituation befragt und sollen im ersten Schritt eine der Verbalkategorien und im zweiten eine Feindifferenzierung anhand der numerischen Skalenstufen auswählen (Neukum et al. 2013, S. 51). Dem Probanden werden Skalenwerte ≥ 7 eindeutig als oberhalb der im Straßenverkehr tolerierten Grenze instruiert, weshalb solche Urteile als mögliche Fail-Kriterien herangezogen werden könnten.

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

Abbildung 9: Störungsbewertungsskala - SBS (Neukum und Krüger 2003) und Skala zur Bewertung von Fahr- und Verkehrssituationen - SBFV (Neukum et al. 2008a)

In Neukum und Krüger (2003) wurde gezeigt, dass Urteile anhand dieser Skalen eher konservativ (d.h. eher zu kritisch) ausfallen und Bewertungen naiver Versuchspersonen auf vergleichbarem Level wie Expertenratings liegen (Galaske et al. 2014).

Da Subjektivurteile aber immer von der persönlichen Einstellung oder prinzipiellen Ablehnungshaltungen von Probanden behaftet sind, erfordert der Umgang mit ihnen Maßnahmen, die solche Urteilseffekte mit einbeziehen. Ein mögliches Verfahren von Neukum et al. (2008b) wird im Folgenden vorgestellt, in dem Störungsbewertungen im Bereich "gefährlich" sequentiell verschiedene Urteilsstufen durchlaufen (vgl. Abbildung 10).

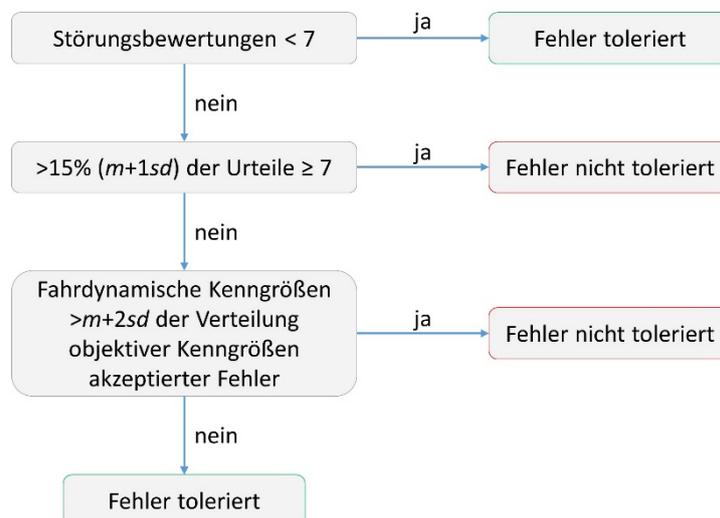


Abbildung 10: Pass-/Fail-Procedere anhand Subjektivurteilen bei Querdynamikstörung (Neukum et al. 2013, S. 53)

Dabei wird bei auftretenden Urteilen > 7 zunächst deren relative Häufigkeit betrachtet und bei weniger als 15% die jeweiligen Objektivmaße herangezogen. Sollte sich herausstellen, dass die objektiven Kennwerte im Bereich von zwei Standardabweichungen (sd)

um den Mittelwert (m) liegen, kann von einem mit Urteileffekt behafteten Rating ausgegangen und der Fehler dennoch toleriert werden (vgl. Neukum et al. 2013, S. 53).

3.1.3 Versuchsplan

Aus den Testfällen gilt es nun, einen geeigneten Versuchsplan zu erstellen. Dazu muss zunächst entschieden werden, ob bei einem Versuch möglichst unabhängig von Fahrer-eigenschaften einzelne Versuchsvarianten (z.B. verschiedene FAS-Auslegungen) interessieren. Dann sollten alle Varianten von denselben Versuchspersonen im sogenannten "within-design" (verbundene Stichproben) getestet werden. Wenn der Einfluss unterschiedlicher Personenvariablen bei der Interaktion mit einem System betrachtet werden soll, ist ein "between-design" (unabhängige Stichproben) die geeignete Wahl (Bubb 2003). Letzteres kann aber auch gewählt werden, wenn sogenannte "Transfer-" bzw. "Lerneffekte" bei der Begegnung mit einem FAS zu erwarten sind (vgl. Bengler und Mayser 2003; Bubb 2003). Bei Notfall-FAS spielt zudem der Erstkontakt eine große Rolle. Dabei ist eine extremere psychophysiologische Erregung zu beobachten (vgl. Fuchs et al. 2008), die sich unter Umständen sogar in einer Schreckreaktion äußert (vgl. Färber 2015). Zudem sind Fahrerreaktionszeiten bei unerwarteten Ereignissen signifikant länger (Fitch et al. 2010), was beim zweiten Erleben einer Situation meist nicht mehr zutrifft (vgl. Lee et al. 2002). Dies spricht ebenfalls für "between"-Vergleiche. Eine Abhilfe kann hier auch durch entsprechende Permutation der einzelnen Versuchsvarianten geschaffen werden (vgl. Bengler und Mayser 2003), oder durch das Einstreuen von Wiederholungen ohne Auslösung des kritischen Ereignisses bzw. des FAS-Eingriffs, sog. "Fake-Events" (Engström und Ljung Aust 2011). Allerdings begrenzt sich durch klassische Permutationsverfahren wie dem lateinischen Quadrat (Winer 1962) die sinnvoll in Fahrversuchen testbare Anzahl an Versuchsvarianten auf vier (Bubb 2003). Bei der Versuchsplanung sollte zudem beachtet werden, dass Probanden abhängig von der Prüfumgebung nur eine begrenzte Konzentrationsdauer besitzen, weshalb der Umfang einer Untersuchung einen bestimmten zeitlichen Rahmen nicht sprengen sollte (Winner et al. 2003). Für eine höhere Anzahl an Varianten sind aufwändigere Anordnungen nötig, für die an dieser Stelle auf Hinkelmann (2008) verwiesen wird.

3.1.4 Stichprobe

Stichproben sollen ein repräsentativer Ausschnitt der Gesamtpopulation sein und stellvertretend urteilen können (Oestreich und Romberg 2012, S. 12). Zur Stichprobe zählen im Wesentlichen zwei Variablen, der Umfang und die Charakteristik. Im Idealfall sollten die Charakteristika derer der späteren Nutzerpopulation entsprechen. "Klumpenstichproben" (Bortz und Schuster 2010, S. 81), d.h. ausschließlich Probanden aus einer bestimmten Gruppe wie z.B. nur Studenten, sollten vermieden werden. Dies ist jedoch in der Praxis nicht immer leicht zu erfüllen, weshalb zumindest auf eine ausgewogene Verteilung im Versuchsplan geachtet werden sollte (Bubb 2003). Das bedeutet beispielsweise zu berücksichtigen, dass nicht alle unerfahrenen Fahrer eine Systemvariante A zuerst testen sollten, sondern entsprechend im Versuchsplan auf die verschiedenen permutierten Reihenfolgen verteilt werden (vgl. Kapitel 3.1.3). Charakteristiken wie die Fahrerfahrung können einen Einfluss auf die Ergebnisse von Probandenversuchen haben. Abendroth und Bruder (2012) charakterisieren den Fahrer durch seine Eigenschaften, seine Fähigkeiten und seine Fertigkeiten. Fähigkeiten wie Intelligenz werden in der Regel bei Fahrversuchen nicht betrachtet, Fertigkeiten, zu denen die Fahrerfahrung zählt, spielen jedoch eine Rolle (vgl. z.B. Deery 1999). Der spezifische Einfluss von Fahrereigenschaften wie Geschlecht, Alter und Persönlichkeit ist hingegen umstritten (Purucker 2013). Das Führerscheinalter ist häufig direkt mit der Erfahrung verbunden und spielt eine wichtige Rolle. Das Lebensalter ist erst dann wichtig, wenn dadurch mentale oder körperliche Beeinträchtigungen entstehen (Abendroth und Bruder 2012; Vollrath und Krems 2011, S. 100). Der Faktor Geschlecht wird zwar in Publikationen häufig berichtet, jedoch wurde bislang keine für das Fahrerverhalten relevante Auswirkung gefunden (Purucker 2013). Persönlichkeitseigenschaften beeinflussen zwar den Fahrstil und damit das Verhalten (vgl. Deml et al. 2007), können aber bei der Auswahl der Stichprobe nur schwer berücksichtigt werden. Vergleichbar der Auswahl der Testfälle muss die Relevanz spezifischer Charakteristika für eine Kontrollierbarkeitsuntersuchung bewertet werden (Weitzel 2013a).

Sollte kein Faktor identifiziert werden, der als unabhängige Variable in die Versuchsplanung miteingehen muss, sollte darauf geachtet werden, dass die Charakteristika der Stichprobe möglichst ausgewogen sind bzw. dem späteren Nutzerkollektiv so nah wie möglich kommen (Neukum et al. 2013, S. 47). Auch in der ISO-Norm 26262 wird ein durchschnittliches Fahrerkollektiv als ausreichend für Kontrollierbarkeitsuntersuchungen betrachtet.

Der benötigte Umfang einer Stichprobe ist von der Fragestellung, dem entsprechenden Versuchsplan und den zu erwarteten Effekten abhängig. Bei Stichprobengrößen von $n \geq 30$ kann durch das zentrale Grenzwerttheorem von einer Normalverteilung der Mittelwertverteilungen ausgegangen werden (Bortz und Schuster 2010, S. 85), was für eine statistische Auswertung anzustreben sein sollte (Bubb 2003). Im Code of Practice wird für Kontrollierbarkeitsstudien eine Mindestanzahl von $n = 20$ gefordert, mit dem Hinweis mögliche Ausreißer zu berücksichtigen (RESPONSE Consortium 2009, S. 15). Die nötigen Probandenzahlen zur Erfüllung der Kontrollierbarkeitsstufe C2 der ISO 26262 wurden bereits in Kapitel 2.1 kontrovers diskutiert.

3.1.5 Fahrerzustand und Fahrererwartungen im Experiment

Die schlichte Anwesenheit eines Versuchsleiters und die Durchführung von Fahrversuchen auf einem abgesperrten Testgelände wird bei einem Probanden einen besonderen Aufmerksamkeitszustand, eine Tendenz zu vorbildlichem Verhalten und eine gewisse Erwartungshaltung auf mögliche außergewöhnliche Ereignisse erzeugen (Krems et al. 2009). Aus der "100-car naturalistic driving study" ist bekannt, dass Unfälle seltene Ereignisse sind, die meist nur durch eine Kombination von kritischer Verkehrssituation und Unaufmerksamkeit des Fahrers ausgelöst werden können (Dingus et al. 2006; Klauer et al. 2006). Reaktionszeiten von Fahrern auf erwartete kritische Ereignisse sind signifikant kürzer, als auf unerwartete (Fitch et al. 2010). Der Fahrer wird in der Erwartung eines kritischen Ereignisses Gegenmaßnahmen einleiten wie Abstand vergrößern oder Geschwindigkeit verringern (Engström und Ljung Aust 2011). Um nun den Fahrer aus seiner "Komfortzone" bzw. dieser "Vorsichtshaltung" heraus und in eine von ihm unerwartete, kritische Fahrsituation zu bringen, muss der Fahrerzustand z.B. durch bewusste Ablenkungen vom Versuchsleiter manipuliert werden.

Ein Mittel dazu sind Coverstories, die dem Fahrer einen völlig anderen Untersuchungszweck vortäuschen, um ein unerwartetes Ereignis überraschend einspielen zu können. Ein Beispiel ist in Färber (2015) aufgeführt, bei dem Probanden die Augen während einer Gerade-Aus-Fahrt schließen sollten. Untersucht wurde laut Coverstory eine Abweichung von der Ideallinie während die Augen geschlossen sind. Ohne Sicht war der Fahrer in einem maximal abgelenkten Zustand, der während einer tatsächlichen ANB-Auslösung erwartet wird. So konnte eine solche Auslösung unter zusätzlicher Plausibilisierung durch ein stehendes klappbares Fahrzeug, auf das gebremst wurde, valide mit kontrolliertem

Fahrerzustand untersucht werden. In Eckert et al. (2011) wurde ein Kollisionsobjekt seitlich in einer künstlichen Baustelle auf einer Teststrecke versteckt. Den Versuchspersonen wurde erklärt, dass dort gerade Asphaltausbesserungs- und Markierungsarbeiten stattfinden. Um ihnen jedoch mögliche Zweifel zu nehmen, wurde die künstliche Baustelle mehrmals passiert, bevor das seitliche Hindernis erschien und eine Gefahrensituation kreierte. Weitere methodische Tricks um Fahrer zu überraschen und aus der Komfortzone zu locken werden in Engström und Ljung Aust (2011) beschrieben. Selbstverständlich müssen die Probanden nach einem Experiment immer über die wahren Versuchsziele aufgeklärt werden.

3.2 Prüfumgebungen

Ein gewichtiger und zentraler Aspekt der Evaluationsmethodik ist die Wahl der Prüfumgebung. Gerade bei der Beurteilung von Notfall-FAS werden häufig Pass-/Fail-Kriterien herangezogen, die Kollisionen nicht ausschließen (vgl. Kapitel 3.1.2), was ganz besondere Herausforderungen und Anforderungen an ein Testverfahren stellt. Im Kontext des Einzuges von FAS in den urbanen Raum, wie im ersten Kapitel beschrieben, können für Kontrollierbarkeitsprüfungen zudem Testfälle in komplexen Umgebungen und dichtem Verkehr gefordert sein. Solche Verhältnisse sind in der Regel nur im Realverkehr, also dem normalen Straßenverkehr vorzufinden. Da aber speziell Sicherheitsfunktionen massive Eingriffe in die Fahrzeugführung beinhalten können, ist eine Kontrollierbarkeitsuntersuchung im Realverkehr mit Risiken verbunden. Deshalb liegt eine Prüfung im Fahr-simulator auf der Hand, in dem solche Einschränkungen zunächst nicht gegeben sind. Dort können Testfälle reproduzierbar ohne Störgrößen wie Wetter oder andere Verkehrsteilnehmer evaluiert werden. Allerdings stellen sich grundsätzliche Fragen der Realitätsnähe von Fahr-simulatoren, wegen unterschiedlicher visueller Darstellungsformen oder fehlender bzw. eingeschränkter Bewegungsrückmeldung (vgl. Blana 1996b; Breuer 2012). Speziell für Notfall-FAS, bei denen die Dynamik eine Wirkung auf die wahrgenommene Kritikalität der Fahrsituation besitzt (vgl. Konertz 2013), werden deshalb Versuche meist im Realfahrzeug aber auf Teststrecken durchgeführt. Die Kulisse eines Testgeländes ist einer innerstädtischen Szenerie normalerweise nicht ähnlich, Ablenkungen durch andere Verkehrsteilnehmer oder bauliche Verdeckungen rar gesät. Auch wenn es theoretisch möglich wäre durch instruierte Fußgänger und andere Fahrzeuge auch auf Teststrecken komplexere Verkehrssituationen nachzustellen, so ist der Aufwand um Sicherheit und Reproduzierbarkeit zu gewährleisten enorm. Ein Ansatz, der dem Fahrer im Realfahrzeug auf einer Teststrecke verkehrsrelevante Objekte virtuell einblendet, wurde von Bock et al. (2005) vorgestellt. Dieser Hybrid aus Realfahrzeug und Sichtsimulation wird als "Vehicle in the Loop", kurz VIL, bezeichnet und wird im weiteren Verlauf neben anderen Prüfumgebungen näher betrachtet.

3.2.1 Versuche im Realverkehr

Testfahrten im realen Straßenverkehr, auch als Feldversuche bezeichnet, bieten zweifelsfrei die höchste ökologische Validität (Breuer 2012). Hersteller sammeln deshalb viele

tausend Testkilometer mit neuen FAS im Straßenverkehr, um diese Systeme einem Praxistest zu unterziehen (vgl. Glauner et al. 2014). Solche Untersuchung setzen aber einen hohen Reifegrad der Funktion und eine Straßenfreigabe voraus und können deshalb erst kurz vor Markteinführung im Zuge einer sogenannten kundennahen Fahrerprobung (KNFE) durchgeführt werden (Fach et al. 2010). Sie dienen hauptsächlich der Generierung von Daten, die z.B. zur Minimierung der Häufigkeit von nicht situationsadäquaten Auslösungen verwendet werden. Aber auch genaue Analysen von Nutzungsverhalten oder Akzeptanzfragen können durch solche Erprobungen beantwortet werden (Breuer 2012). Es ist ebenfalls möglich Fragen der Beherrschbarkeit in Feldversuchen zu evaluieren. Beispielsweise wurden die Kontrollierbarkeit der Systemgrenzen von ACC bei Schmitt et al. (2006) und Neukum et al. (2008a) im realen Straßenverkehr untersucht. Dies erfordert aber spezielle Sicherheitsmaßnahmen durch Fahrschulpedalerie (Neukum et al. 2008a) oder trainierte Fahrer bei möglichen Konfliktpartnern wie stehenden Hindernissen, die bei zu später Reaktion eines Probanden wegbeschleunigen (Schmitt et al. 2006). Ebenfalls durch eine Fahrschulpedalerie sicherten Neukum et al. (2014) eine Kontrollierbarkeitsuntersuchung von nicht situationsadäquaten Bremsengriffen aus Sicht des Folgeverkehrs ab. Ein schwierig zu kontrollierender Faktor im Feld sind Störvariablen durch äußere Einflüsse, deren Auswirkungen aber für eine klare Aussage zu den untersuchten Hypothesen so gering wie möglich gehalten werden müssen (Vollrath und Krems 2011, S. 83). Da solche Nachteile häufig überwiegen, sind insgesamt nur sehr wenige Kontrollierbarkeitsuntersuchungen im Feld bekannt. Speziell bei Beherrschbarkeitsfragen von Notfall-FAS, die Kollisionen während der Untersuchung nicht gänzlich ausschließen, dominieren oft Sicherheitsbedenken, weswegen auf andere Prüfumgebungen zurückgegriffen wird (Breuer 2012).

3.2.2 Versuche auf der Teststrecke

Ein abgeschlossenes Testgelände stellt eine Prüfumgebung dar, in der eine Gefährdung von anderen Verkehrsteilnehmern ausgeschlossen ist, die immensen Vorteile eines realen Fahrzeuges aber erhalten bleiben. Teststreckenversuche sind besonders geeignet, wenn Fahrzeugreaktionen bedeutsamen Einfluss haben und Verkehrssituationen nicht zu komplex sein müssen (Fach et al. 2010). Die Schwierigkeit, vor allem bei der Evaluation von Notfall-FAS, ist das Erzeugen von überraschenden oder kritischen Fahrsituationen ohne gleichzeitige Gefährdung des Versuchsträgers bzw. der Probanden. Die Auslösung eines

Notfall-FAS findet in der Regel nur statt, wenn ein Fahrer unaufmerksam ist oder beispielsweise durch Fehlverhalten wie zu dichtem Auffahren oder überhöhter Geschwindigkeit, kritische Fahrsituationen provoziert. Um eine Versuchsperson die, wie in Kapitel 3.1.5 beschrieben, darin bemüht ist, besonders aufmerksam und vorbildlich zu agieren, auf einem übersichtlichen Testgelände überraschend in eine kritische Fahrsituation zu bringen, ist ein gelungenes Zusammenspiel aus geschickten Ablenkungen und geeigneten Prüfaufbauten erforderlich (vgl. Färber 2015).

Solche Prüfaufbauten, die bei Kontrollierbarkeitsuntersuchungen von Notfall-FAS hauptsächlich zur Plausibilisierung eines Eingriffs dienen, sind z.B. in Fecher et al. (2008) überblicksartig für Frontalkollisionsgegenmaßnahmen dargestellt. Auch in Neukum et al. (2013, S. 68-71) werden zahlreiche solcher Prüfaufbauten beschrieben. Ein System zu dem mehrere Publikationen zu finden sind, ist das Darmstädter Dummy-Target EVITA (Hoffmann und Winner 2007, 2008a, 2008b; Fecher et al. 2008; Fecher et al. 2009; Fuchs et al. 2008; Weitzel 2013b).



Abbildung 11: Dummy-Target EVITA mit Zugfahrzeug (Hoffmann und Winner 2012, S. 70)

Hierbei handelt es sich um eine Fahrzeugsilhouette auf einem Anhänger, der über eine Seilwinde mit dem Zugfahrzeug verbunden ist (vgl. Abbildung 11). Bei Auslösung wird der Anhänger abgebremst und das Seil wickelt sich ab. Bei einer eingestellten Time to Collision (TTC), die durch einen Radarsensor zum Versuchsfahrzeug bestimmt wird, schließt sich die Seilbremse und das Target wird vom Zugfahrzeug ruckartig nach vorne aus der Gefahrenzone beschleunigt (Hoffmann und Winner 2008b). Ein weiteres Prüftool, das vor allem auch zur Anfahrtsüberwachung nach ANB-Auslösungen eingesetzt werden kann, ist ein klappbares Fahrzeug, das in der Regel über einen Pick-Up-Truck und Querträgeraufbauten auf der Nebenfahrbahn des Trucks bewegt und im Kollisionsfall nach

vorne oben weggeklappt wird. Solche Seiten-Ausleger-Systeme wurden u.a. von Daimler, Continental oder Bosch (vgl. Abbildung 12) für längsdynamische Testzwecke verwendet (Daimler Chrysler 2005; McConnell 2004).



Abbildung 12: Seitenausleger-Crashmatic von Bosch

Im Bereich der Notfall-FAS mit Eingriffen in die Querdynamik sind Hindernisse erforderlich, die seitlich in die Fahrbahn ragen. Bei Bender et al. (2007a, 2007b) wurde dafür eine druckluftbetriebene Gummistruktur verwendet, die sich - getriggert von einer Lichtschranke - innerhalb kürzester Zeit aus einem Kegel am Fahrbahnrand entfaltet und die halbe Fahrspurbreite ausfüllte. In Eckert et al. (2011) wird ein leichtes Balloon-Car über eine Katapultvorrichtung aus einer Verdeckung auf die Fahrbahn befördert. Je nach Bedarf konnte das Balloon-Car damit den ganzen oder nur halbe Fahrstreifen abdecken. Hahn et al. (2012) entwickelten ein Seilzugsystem, mit dem Fahrzeugattrappen als Konfliktpartner mit einer Elektrowinde über Kreuzungen gezogen werden können. In derselben Veröffentlichung wurde auch eine Fußgängerbrücke vorgestellt. Hierbei handelt es sich um ein Gestell, das in mehreren Metern Höhe quer über die Fahrbahn reicht und an dem nach unten hängende Fußgängerattrappen über Seilzüge bewegt werden können.



Abbildung 13: Seitliches Dummy-Target CAPLOS

Ein System, das ausparkende Fahrzeuge oder auf die Straße tretende Fußgänger simulieren soll, ist das CAPLOS-System der UniBw München (siehe Abbildung 13). Über Pneumatik wird eine crashbare fotorealistische Fahrzeug- (oder Fußgänger-) Silhouette von der Seite in die Fahrbahn bewegt. Über Lichtschranken oder eine WLAN-Verbindung vom Versuchsträger aus kann das System ausgelöst, als auch auf ähnliche Weise wieder eingefahren werden.

3.2.3 Fahrsimulatoren

Prüfaufbauten, wie im Kapitel zuvor beschrieben, die auf Teststrecken zur sicheren und reproduzierbaren Gestaltung von Testfällen benötigt werden, sind für Fahrsimulatorstudien keine Notwendigkeit (Breuer 2012). Der präzisen und beliebig detailreichen Gestaltung von Szenarien sind bei einer modernen Simulationssoftware wie "Virtual Test Drive" (Neumann-Cosel et al. 2009) oder "SILAB" (WIVW 2014) nahezu keine Grenzen gesetzt. Sehr wohl muss bei Untersuchungen im Fahrsimulator aber die Frage gestellt werden, ob deren Ergebnisse repräsentativ für reales Fahrerverhalten sind, da Einschränkungen bei der Nachbildung realer Gegebenheiten in der visuellen Darstellung und im vestibulären Feedback bestehen (vgl. hierzu auch Kapitel 4). Deshalb ist die diesbezügliche Performanz eines Fahrsimulators ausschlaggebend für die Art der Testfälle, die damit sinnvoll evaluiert werden können (Fisher et al. 2011). Diese Leistungsfähigkeit variiert je nach Ausstattung und Art der Fahrsimulatoren sehr stark (Blana 1996a). Im einfachsten Falle besteht ein Fahrsimulator aus einem Bildschirm, einem Lenkrad und Pedalerie und wird als "Sitzkiste" (vgl. Abbildung 14, links) bezeichnet (Neukum et al. 2013, S. 59). Solche Systeme dienen in der Regel als fahrähnliche Nebenaufgabe z.B. bei der Untersuchung von HMI-Konzepten (z.B. Hilbig 2012; Götze et al. 2013) oder können Fragen auf der strategischen Entscheidungsebene des Fahrers adressieren wie beispielsweise effiziente Beschilderung zu gestalten ist (z.B. Färber et al. 2007). Fahrerverhalten wie im Realfahrzeug ist auch in sogenannten statischen Fahrsimulatoren (vgl. Abbildung 14, rechts) aufgrund der nicht vorhandenen Beschleunigungsreize oft nicht zu erreichen. Dafür bietet ein detailgetreues Fahrzeug-Mockup gute Möglichkeiten Ergonomie- oder HMI-Konzepte zu untersuchen (z.B. Olaverri-Monreal et al. 2013; Schömig et al. 2015).



Abbildung 14: Sitzkiste der TU Kaiserslautern (Lehrstuhl für Mechatronik in Maschinenbau und Fahrzeugtechnik 2011) und statischer Fahrsimulator der BAST (Frey 2014, S. 38)

Sobald dynamische Größen eine Rolle spielen, was z.B. bei der Interaktion mit Notfall-FAS prinzipiell immer der Fall ist, ist eine vestibuläre Rückmeldung unerlässlich (vgl. Correia Gracio et al. 2011; Engström und Ljung Aust 2011). Dieses Feedback wird bei den meisten Fahrsimulatoren durch ein Hexapod-System erzeugt (Negele 2007), aber auch Industrieroboterarme, wie in Hess et al. (2013) vorgestellt, können als Bewegungsplattform für einen dynamischen Simulator dienen. Bei sehr aufwändigen Konstruktionen, wie dem Daimler-Simulator (vgl. Abbildung 15, rechts) ist zusätzlich ein Translationsystem zur längeren Aufrechterhaltung und Intensivierung von Beschleunigungsreizen vorhanden (Breuer 2012).

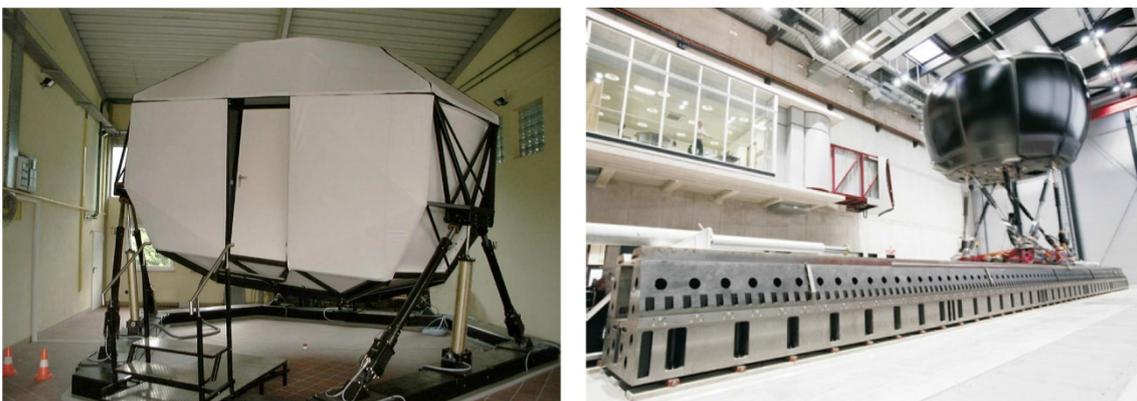


Abbildung 15: Dynamische Simulatoren des WIVW (Frey 2014, S. 40) und der Daimler AG (Breuer 2012, S. 58)

Unter der Berücksichtigung der Anforderungen zur validen Untersuchung eines Testfalls (siehe Kapitel 4) können solche Fahrsimulatoren vor allem in frühen Entwicklungsphasen gute Hinweise auf die Kontrollierbarkeit von FAS der aktiven Sicherheit liefern (Engström und Ljung Aust 2011). Sie ermöglichen damit auch, frühzeitig Normalfahrer in den

Entwicklungsprozess mit einzubeziehen (Buld et al. 2003; Jianqiang et al. 2010). Sogar Interaktionen von Fahrern mit anderen (nicht simulierten) Fahrern sind durch die Vernetzung von Fahrsimulatoren möglich (vgl. Maag et al. 2012; Mühlbacher 2013).

Ein Problem, das aber bei nahezu allen Fahrsimulatoren auftritt, ist die sogenannte "Simulatorkrankheit" oder auch "Simulator-Sickness", eine spezielle Ausprägung von "Motion-Sickness" (Kennedy et al. 1992). Diese wird vermutlich durch sensorische Konflikte ausgelöst und kann durch spezielle Trainings gemildert bzw. ganz beseitigt werden (Hoffmann et al. 2003). Für viele Simulatoren bestehen deshalb Probandenpools aus Testpersonen, die ein Simulator-Training erfolgreich absolviert haben. Dabei muss aber hinterfragt werden, ob Fahrer ihr Verhalten an die Begebenheiten des Simulators anpassen und ihr Fahrerverhalten deshalb verändern (vgl. Engström und Ljung Aust 2011). Weiterhin kann es durch Probandenpools dazu kommen, dass Fahrer mit Vorerfahrungen an Versuchen teilnehmen, was vor allem bei der Wichtigkeit des Erstkontakts bei Notfall-FAS nachteilig sein kann (Engström und Ljung Aust 2011; Breuer 2012).

Empirische Untersuchungen mit Fahrsimulatoren

Zahlreiche Fahrsimulatorstudien beschäftigen sich mit Vergleichen zu Realfahrten in sog. Validierungsstudien. Dadurch soll gezeigt werden, dass Ergebnisse, die in einem Simulator-Setup ermittelt wurden, Gültigkeit für die Realität haben (Mullen et al. 2011). Sinnvollerweise sollten solche Studien immer dann durchgeführt werden, wenn sich der Simulations-Aufbau entscheidend ändert oder nicht klar ist, ob früher durchgeführte Validierungsstudien für die neu geplante Untersuchung Gültigkeit besitzen (Jamson 2011). Leider findet dieses Procedere in der Praxis selten statt (Blaauw 1982). Zudem existiert kein einheitliches Verfahren zur Validierung (Blana 1996b). Da das Thema der Validität in Kapitel 4 noch einmal aufgegriffen wird, soll an dieser Stelle eine thematisch zugeordnete Zusammenstellung publizierter Validierungsstudien (Tabelle 3) genügen. Ausführliche Abhandlungen zur Validität von Fahrsimulatoren sind in Blana (1996b), Kaptein et al. (1996), Mullen et al. (2011), Boyle und Lee (2010) und bei Zöllner et al. (2013; 2015) zu finden.

Tabelle 3: Erweiterung der Übersicht zu Validierungsstudien von Neukum et al. (2013, S. 60) zitiert nach Mullen et al. (2011, S. 13-5 - 13-6)

Untersuchungsgegenstand:	Publikation:
Gefahrenwahrnehmung	Bedard et al. (2010), Frey (2014), Neukum et al. (2014), Purucker et al. (2014), Rudin-Brown et al. (2009), Rürger et al. (2014)
Geschwindigkeitswahl und Geschwindigkeitsanpassung	Abendroth et al. (2012), Bella (2005), Bella (2008), Bittner et al. (2002), Brünger-Koch et al. (2006), Charlton et al. (2008), Fildes et al. (1997), Frey (2014), Godley et al. (2002), Harms (1996), Hoffman et al. (2002), Klee et al. (1999), McAvoy et al. (2007), Meuleners und Fraser (2015), Panerai et al. (2001), Pyne et al. (1995), Reimer et al. (2006), Riemersma et al. (1990), Risto und Martens (2014), Shinar und Ronen (2007), Terumitsu et al. (2007), van der Horst, R. (1996), Yan et al. (2008)
Güte der Spurhaltung und Querregelung	Abendroth et al. (2012), Blaauw (1982), Blana und Golias (2002), Brünger-Koch et al. (2006), Harms (1996), Knappe (2009), Philip et al. (2005), Reymond et al. (2001), Rürger et al. (2014), Törnros (1998), Wade und Hammond (1998)
Blickverhalten	Abendroth et al. (2012), Charlton et al. (2008), Engström et al. (2005), Fisher et al. (2007)
Reaktionszeit	Hoffman et al. (2002), McGehee et al. (2000), Neukum et al. (2014)
Alter	Casutt et al. (2014), Lee (2003), Shanmugaratnam et al. (2010)
Workload	Ceci et al. (2001), Engström et al. (2005)

Zur Kontrollierbarkeit von FAS sind nur wenige Veröffentlichungen bekannt, die Fahr-simulatoren als Werkzeug einsetzen. Häufiger sind Untersuchungen, die das Potential von Eingriffen der aktiven Sicherheit ermitteln (Itoh et al. 2011; Keller et al. 2014; Kleen und Schmidt 2009) oder der Funktionsgestaltung von FAS dienen (vgl. Buld et al. 2003; Gietelink et al. 2006; Chen und Ulsoy 2002; Lee et al. 2002). Bei Notbremsassistentensystemen untersuchten Fach et al. (2010) und Neukum et al. (2014) in einem dynamischen Fahr-simulator, ob autonome Bremsengriffe aus Sicht des Folgeverkehrs kontrollierbar sind. Im Bereich von Lenkeingriffen sind Veröffentlichungen von Kleen und Schmidt (2009) und Neukum et al. (2010b) vorhanden, die sich mit der Kontrollierbarkeit von Zusatzlenkmo-menten beschäftigen. Bei Kleen und Schmidt (2009) kam dafür ein statischer Fahr-simulator zum Einsatz. Neukum et al. (2010b) verwendeten zusätzlich zum Realfahrzeug einen "Motion Chair", womit ein Fahr-simulator bezeichnet wird, bei dem das Sichtsystem statisch, das Mockup aber auf einem Hexapod gelagert ist und somit vestibuläres Feed-back an den Fahrer geben kann.

3.2.4 Vehicle in the Loop

Das Vehicle in the Loop (VIL) ist ein Testwerkzeug, das ein Realfahrzeug mit einer Sichtsimulation kombiniert. Während ein Fahrer ein reales Fahrzeug auf einer Teststrecke bewegt, bekommt er z.B. über ein Head Mounted Display (HMD) entweder virtuelle Objekte (Augmented Reality, abgekürzt: AR) oder eine vollständige virtuelle Welt angezeigt (Virtual Reality, abgekürzt: VR). Fahrgefühl und -erleben des echten Fahrzeuges (also alle nicht-visuellen Reize) bleiben erhalten. Da situationsrelevante Objekte nur virtuell existieren, können Untersuchungen mit einem hohen Maß an Sicherheit und Reproduzierbarkeit durchgeführt werden (Bock et al. 2008). Die ursprüngliche Version des VIL basiert auf einer Idee von Bock, der das System entwickelt und validiert hat (Bock et al. 2005; Bock et al. 2007; Bock 2008; Bock et al. 2008). In der Variante von Bock (2008) wurde das VIL mit Augmented Reality (AR) betrieben. Nur relevante Objekte wie vorausfahrende Fahrzeuge wurden über ein see-through-HMD eingeblendet. Nachteile dieser Methode sind schwache Kontraste der virtuellen Objekte bei Sonneneinstrahlung sowie Positionierungsfehler, die z. B. den Eindruck entstehen lassen, dass eingeblendete Fahrzeuge schweben oder im Boden versinken (Bock 2008). Berg (2014) entwickelte deshalb auf Basis der VIL-Version von Bock (2008) sowie Starke und Hänsel (2011) eine Variante mit Virtueller Realität (VR). Dies bedeutet, der Fahrer sieht die reale Umgebung während der Fahrt nicht, sondern eine vollständige virtuelle Welt. Da nach diesem Prinzip andere Verkehrsteilnehmer und Umwelt (Straßen, Gebäude etc.) künstlich erzeugt werden, treten Fehler in der relativen Positionierung nicht mehr auf und Versink-/Schwebeeffekte wie bei Bock (2008) bleiben aus. Auch mangelnder Kontrast wird ohne see-through-Funktion nicht mehr wahrgenommen (Berg et al. 2011). Die technische Funktionsweise des Setups von Berg (2014) soll im Folgenden näher beschrieben werden.

Funktionsprinzip des VIL

Durch die Besonderheit des VIL, bei simulierter visueller Umwelt mit einem Realfahrzeug tatsächlich zu fahren, muss die Streckengeometrie der virtuellen mit der realen Welt übereinstimmen. Das wird gelöst, indem die genauen Koordinaten der Testfläche als Berandung bei der Erstellung der virtuellen Welten herangezogen werden (vgl. Abbildung 16). Zusätzlich müssen zu jedem Zeitpunkt Lage und Position des Fahrzeuges bekannt sein, was über eine inertielle Messplattform (IMU) mit DGPS-Korrekturdaten realisiert wird. Wegen der Visualisierung der virtuellen Realität über ein HMD müssen auch Lage und Position des Kopfes bestimmt werden.

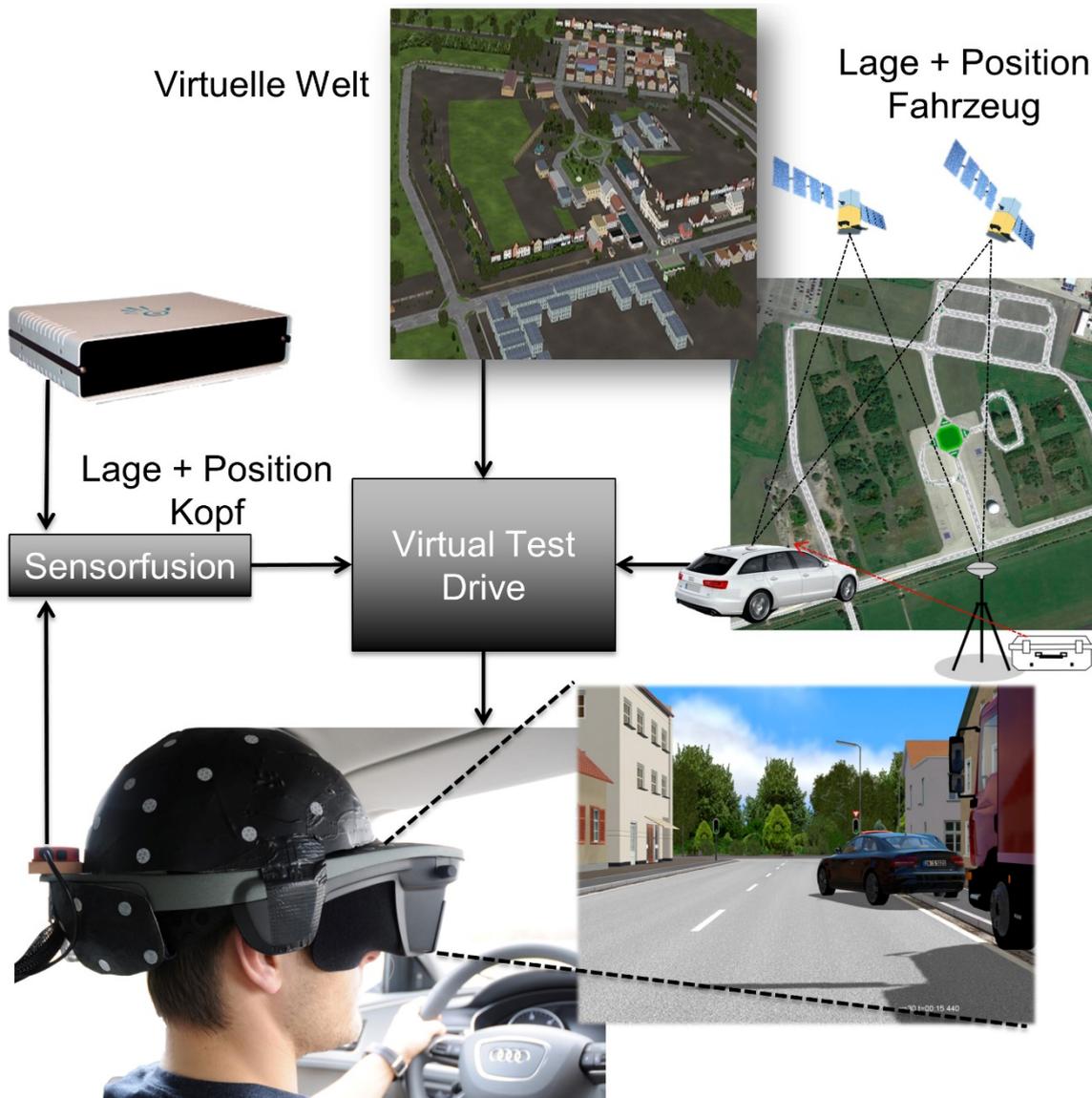


Abbildung 16: Funktionsweise des VIL

Hier hat Berg (2014) ein nahezu latenzfreies Verfahren entwickelt, in dem ein optischer Tracker und eine Inertialmesseinheit durch ein Kalman-Filter fusioniert werden (vgl. Abbildung 16). Diese Daten fließen, wie in Abbildung 16 zu sehen, alle in der Simulationssoftware „Virtual Test Drive“ (VTD) zusammen. Diese generiert so aus dem 3D-Modell der virtuellen Welt und der Verkehrssimulation ein aktuelles Bild mit einer Taktrate von 60 Hz, abhängig von Position und Lage des Fahrzeuges und dem Kopf des Fahrers (Neumann-Cosel et al. 2009).

Als HMD wird das NVIS nVisor ST50 (NVIS Inc. 2009a) verwendet, das ein Blickfeld von $40^\circ \times 32^\circ$ bei einer Auflösung von 1.9 Bogenminuten/Pixel und einem Kontrast von 10000:1 besitzt. Es kann sowohl in Stereo- als auch Monovision betrieben werden. Weitere technische Details zum VIL können bei Berg (2014, S. 7-27) nachgelesen werden.

Empirische Untersuchungen mit dem VIL

Nach der Validierung der AR-Variante durch Bock et al. (2007) wurden keine weiteren Untersuchungen mit diesem VIL-Setup publiziert. Das VR-VIL von Berg (2014) wurde ebenfalls einer Validierung (nähere Betrachtung in Kapitel 4) unterzogen (Berg et al. 2011; Karl et al. 2013). Dabei wurden verschiedene längsdynamische Fahrmanöver (z. B. kritische Bremsung) in je zwei virtuellen Welten mit einer Realfahrt verglichen. Die virtuellen Welten unterschieden sich im Detailgrad, wobei eine so schlicht wie möglich gehalten und der realen Teststrecke nachempfunden (vgl. Abbildung 17, detailarme Welt), die andere hingegen mit zahlreichen Objekten wie Häusern und Bäumen versehen wurde (vgl. Abbildung 17, detailreiche Welt).



Abbildung 17: Detailreiche (links), detailarme Welt (mittig) und reale Teststrecke (rechts) (Karl et al. 2013, S. 48)

80% der Probanden attestierten bei dieser Studie der Fahrt im VIL (sehr) hohe Realitäts-treue (Karl et al. 2013). Fahrer zeigten sowohl im VIL als auch bei den Realfahrten immer situationsadäquate Reaktionen und konnten die Kritikalität von Fahrsituationen richtig einschätzen und ihr Verhalten daran angemessen anpassen. Aufgrund von Unterschieden bei der Wahrnehmung von Abständen, verlängerten Reaktionszeiten im VIL und dadurch bedingten Änderungen beim Beschleunigungs-/Verzögerungsverhalten wird dem VIL zunächst relative Validität (gemäß Blaauw 1982) beim Fahrerverhalten zugesprochen (Karl et al. 2013). Der Detailgrad der Welten rief keine signifikanten Unterschiede bei den Fahrerleistungen hervor. Lediglich der Immersionsgrad war in der detailreicheren Welt signifikant höher (Karl et al. 2013). Im Gegensatz zum AR-VIL von Bock (2008) wurden mit der VR-Variante bei 94% aller Teilnehmer leichte Symptome von Simulatorkrankheit (erhoben gemäß Kennedy et al. 1992; Kennedy et al. 1993) beobachtet, 4% mussten den Versuch frühzeitig abbrechen (Karl et al. 2013). Hauptgrund hierfür lag vor

allem in einer Latenz von ca. 130 ms, die bei der Visualisierung der virtuellen Welt auftrat. Vor allem die Verzögerungen beim Headtracking mit ca. 70 ms Latenz (Berg 2014, S. 89) bewirkten bei Kopfdrehungen eine verlangsamte Anpassung des Bildes, wodurch manchen Probanden unwohl wurde (Karl et al. 2013).

Erschwerend kam im wahrsten Sinne des Wortes das verwendete HMD, NVIS nVisor SX111 (NVIS Inc. 2009b) hinzu, das mit ca. 1.5 kg bei längerem Tragen weitere Symptome hervorrufen konnte (Karl et al. 2013). Deshalb wurde in Berg (2014) mit dem NVIS nVisor ST50 ein leichteres HMD mit kleinerem Gesichtsfeld, aber höherer Auflösung und Kontrast, mit dem zuvor verwendeten NVIS nVisor SX111 verglichen. Es zeigte sich in einem Versuch mit 48 Probanden, die jeweils sechs Fahrsituationen mit beiden HMD durchfuhren, dass das kleinere horizontale Gesichtsfeld (HFOV) von nur 40° des ST50 keine merklichen Nachteile zum deutlich größeren HFOV von 102° des SX111 aufweist. Symptome der Simulatorkrankheit traten mit dem ST50 aber signifikant seltener auf (Berg 2014, S. 83-86).

Das Problem der Latenz im Tracking der Kopfbewegungen wird ebenfalls in Berg (2014) adressiert. Die Sensordaten einer zusätzlich am HMD angebrachten Inertialmesseinheit wurden mit den Signalen des in Karl et al. (2013) verwendeten optischen Tracker fusioniert. Über eine Prädiktion der Kopfbewegungen mit einem Extended-Kalman-Filter konnte die Latenz des Headtrackings fast gänzlich eliminiert werden (siehe dazu Berg 2014, S. 97-117). In einem Probandenversuch mit 36 Teilnehmern wurde das Verfahren evaluiert und von den Versuchspersonen als merkliche Verbesserung eingestuft, da das Bild den Kopfbewegungen auf eine natürlichere Weise folgt (Berg 2014, S. 116-117).

In einer VIL-Konfiguration mit dem HMD nVisor ST50, aber noch ohne den beschriebenen Verbesserungen im Headtracking, führten Sieber et al. (2013) eine Untersuchung mit aktivem Eingriff eines FAS im VIL durch. Hierbei handelte es sich um einen Vergleich zweier Ausweichempfehlungen mit unterschiedlich starkem Lenkmoment. Beide Empfehlungen wurden in einer Querverkehrssituation gegeben, in der ein Fahrzeug von rechts in eine Kreuzung einfuhr, bei einer TTC von ca. 1.1s zum Stehen kam und dabei 1m in den Fahrstreifen des Testfahrers ragte. Alle 48 Fahrer erlebten dieses Szenario jeweils mit beiden Ausweichempfehlungen, sowohl im VIL wie auch im Realfahrzeug. Es zeigten sich signifikante Unterschiede bei den betrachteten Variablen Lenkradwinkel und Lenkradwinkelgeschwindigkeit zwischen VIL und Realfahrzeug (Sieber et al. 2013). Allerdings treten keine Interaktionseffekte zwischen der Prüfumgebung und den variierten

Ausweichempfehlungen auf, weshalb dem VIL auch hier relative Validität gemäß Blaauw (1982) attestiert wird (Sieber et al. 2013).

Ein weiteres Assistenzsystem, das mit einem VR-VIL untersucht wurde, ist das Active-Safety-Light, das dem Fahrer bei Nacht über Lichtspots eine Fahrtrichtung vorgeben und so Kollisionen verhindern soll. Diese Untersuchung wurde von Laschinsky et al. (2010), allerdings in einem leicht technisch abweichendem VIL-Setup erhoben. Dabei konnte das Potential eines solchen FAS nachgewiesen werden, ein Vergleich mit Realfahrten ist aber nicht durchgeführt worden (Laschinsky et al. 2010).

4 Validität von Versuchsergebnissen

Der Begriff der Validität wurde im Zusammenhang mit Prüfumgebungen schon mehrmals verwendet. Diese haben einen nicht unwesentlichen Einfluss darauf, ob Ergebnisse einer Untersuchung in einer bestimmten Prüfumgebung das Fahrerverhalten bei der Interaktion mit einem FAS in der Realität widerspiegeln können (Fecher et al. 2008). Aber auch die Wahl eines falschen Versuchsdesigns mit all seinen Facetten kann dazu führen, dass die Ergebnisse eines Experiments von der Realität abweichen (Vollrath und Krems 2011, S. 91-93). Der Begriff der Validität soll deshalb nicht einschränkend auf Prüfumgebungen, auch wenn diese hier vornehmlich betrachtet werden, sondern ganzheitlich auf Evaluationen von FAS und deren Resultate verstanden werden. Er gibt an, ob in einer Untersuchung das gemessen wird, was man auch messen will (Bortz und Schuster 2010, S. 8). Hinweise zur Stichprobe und dem Design von Kontrollierbarkeitsuntersuchungen, auch im Anbetracht von Validität erfolgten bereits in Kapitel 3.1. Verschiedene Prüfumgebungen als Hauptfaktor der Untersuchungssituation wurden ebenfalls schon in Kapitel 3.2 vorgestellt und teilweise auch schon auf deren Validität eingegangen. In diesem Kontext gibt es mehrere Quellen, vornehmlich aus dem Umfeld der Fahrsimulation, die sich näher mit dem Validitätsbegriff auseinandersetzen und zunächst zwischen verschiedenen Arten der Validität differenzieren. Die Wichtigsten sollen hier vorgestellt werden:

Ökologische Validität:

Darunter wird verstanden, wie ähnlich eine Prüfumgebung alleine durch ihre Bauweise oder Beschaffenheit dem natürlichen Fahren im Straßenverkehr ist (Mullen et al. 2011).

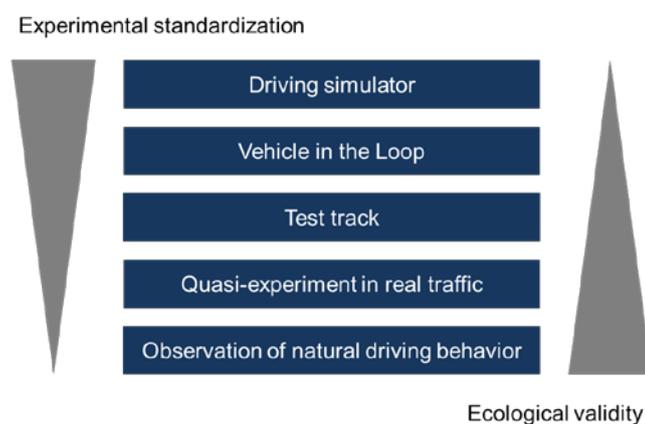


Abbildung 18: Ökologische Validität verschiedener Prüfumgebungen (Purucker et al. 2014, S. 422)

Wie in Abbildung 18 dargestellt, kommt eine Fahrstudie im Realverkehr dem am nächsten, weil der Fahrer nur durch einen Versuchsleiter und mögliche Prüfaufbauten bzw. Instruktionen beeinflusst wird. Auf der Teststrecke fährt er zudem in einer künstlichen Umgebung, die beim Vehicle in the Loop auch noch durch ein anderes Sichtsystem eingespielt wird. In der Fahrsimulation wird auch das Fahrzeug und dessen Verhalten simuliert, weswegen die ökologische Validität dieser Umgebung am geringsten ist (Purucker et al. 2014). Wie gut wiederum die Fahrdynamik sowie die physikalischen Aufbauten (Lenkrad, Pedale etc.) inkl. deren Rückmeldungen (Stellkräfte, Geräusche) durch einen Simulator nachgebildet werden können, beschreibt die **physikalische Validität** (Blaauw 1982), die somit als Teil der ökologischen Validität angesehen werden kann.

Verhaltensvalidität:

Das Maß mit dem eine Prüfumgebung natürliches Fahrerverhalten wie im Straßenverkehr bei Probanden hervorruft, wird als Verhaltensvalidität bezeichnet (Mullen et al. 2011). Dabei spricht man von **absoluter Validität**, wenn in Prüfumgebungen auch numerisch dieselben Ergebnisse erzielt werden wie im Realverkehr (Blaauw 1982). In der Praxis wird das häufig angenommen, wenn zwischen Mittelwerten und Varianzen der Messgrößen aus beiden Umgebungen kein signifikanter Unterschied besteht (Abendroth et al. 2012). In Mullen et al. (2011) wird das praktische Vorgehen aus verschiedenen Validierungsstudien überblicksartig dargestellt. Die Argumentation für Validität wird dort zusätzlich über den Nachweis von Zusammenhängen über Korrelationen geführt. Liegt keine absolute Validität vor, aber Ergebnisse weisen einen ähnlichen Betrag auf und gehen in dieselbe Richtung, so spricht man von **relativer Validität** (Blaauw 1982). Eine Argumentation für relative Validität kann über die Standardabweichung von Messergebnissen geführt werden, die z.B. bei Bremsungen in kritischen Situationen kleiner als in harmlosen Situationen ist (Engström und Ljung Aust 2011). Ebenso kann relative Validität bei unterschiedlichen Mittelwerten der Messergebnisse zwischen Simulator und Realfahrzeug über Korrelationen nachgewiesen werden (vgl. Mullen et al. 2011). In Sieber et al. (2013) wurden keine Interaktionseffekte zwischen Testvariable und Prüfumgebung gefunden und damit relative Validität begründet. Eine subjektive Rückmeldung der Fahrer, die eine Prüfumgebung aus ihrer Sicht als realistisch bezeichnen, wird **Augenscheinvalidität** genannt (Blana 1996b). Dieses Urteil kann aber durchaus konträr zur beobachteten Validität des

Fahrerverhaltens sein und wird deshalb als gewünschtes aber nicht hinreichendes Argument eingestuft (Kaptein et al. 1996).

4.1 KON-Parameter: Evaluation von Simulationsumgebungen

Fragestellungen im Bereich der Kontrollierbarkeit werden binär entschieden (siehe Kapitel 3.1.2) Der Einsatz von Simulationsumgebungen zur Evaluation ist deshalb mit Herausforderungen verbunden, da kleine Abweichungen im Fahrerverhalten zu falschen Entscheidungen führen könnten. Wie bereits im Kapitel 3.2.3 und im Abschnitt zuvor angedeutet, existieren keine einheitlichen Verfahren, um die Tauglichkeit von Simulationsumgebungen zu überprüfen. Mit der Ermittlung der "KON-Parameter" wird im Folgenden ein Vorgehen vorgestellt, das die Eignungsevaluation einer Simulationsumgebung für Kontrollierbarkeitsuntersuchungen ermöglichen soll.

Grundsätzlich sollte im Vorfeld einer Eignungsevaluation überprüft werden, dass die Anforderungen von Testfällen in der Simulationsumgebung realistisch abbildbar sind. Es muss ermittelt werden, wie weit der Untersuchungsgegenstand tolerant gegenüber den Unterschieden zwischen Simulationsumgebung und Realfahrt ist. Das heißt ein Lenkimpuls kann beispielsweise nur dann in einer Simulationsumgebung untersucht werden, wenn physikalische Validität der Lenkaktuatoren gegeben ist und der Impuls sich für den Fahrer identisch wie im Realfahrzeug anfühlt. Andererseits haben Winner et al. (2003) gezeigt, dass die Untersuchungsergebnisse der Systemgrenzen von ACC weitgehend unabhängig von der genauen Funktionsausprägung in verschiedenen Studien mehr oder weniger gleich waren. In solchen Fällen wären Abweichungen in der Darstellung der Funktion z.B. durch unterschiedliche Aktoren im Simulator zulässig. Den Nachweis, dass solche Abweichungen erlaubt sind, oder nicht existieren, kann durch ein interdisziplinäres Expertenteam oder Vorversuche erfolgen.

Sind diese Aspekte erfüllt, sollte eine Eignungsfeststellung gemäß dem Vorgehen erfolgen, das in Abbildung 19 dargestellt ist.

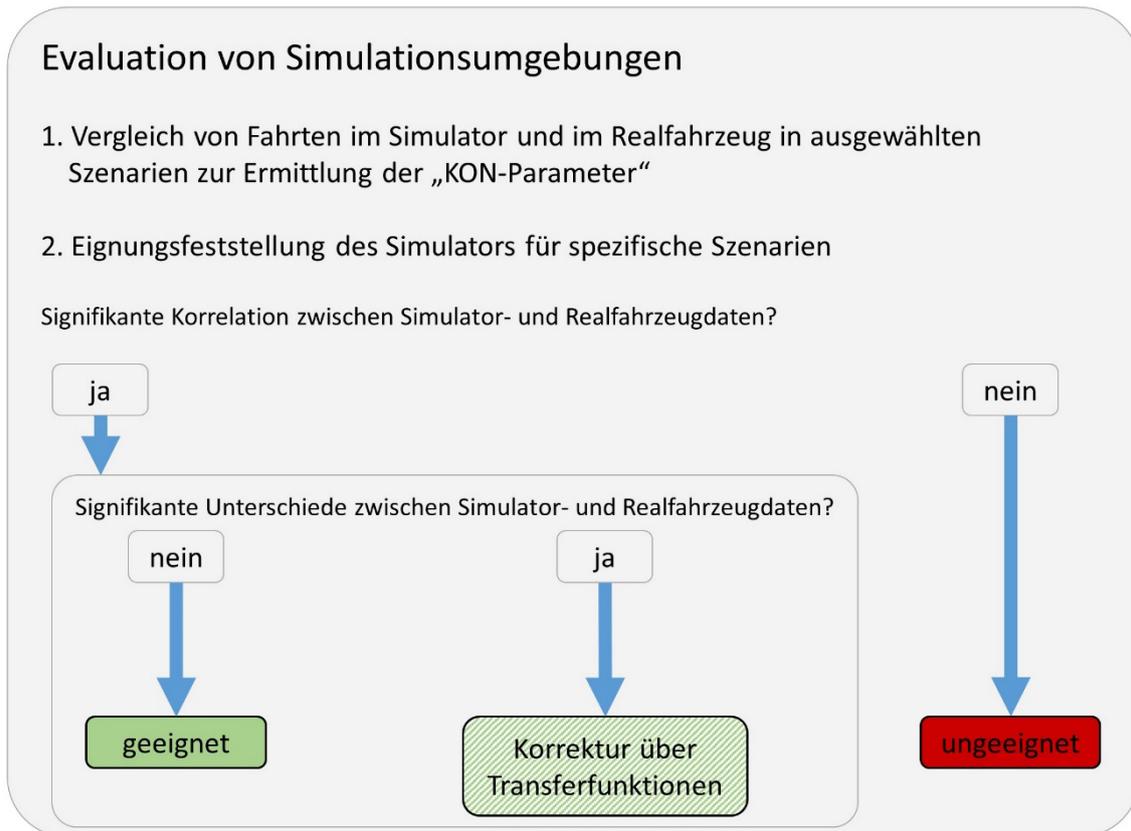


Abbildung 19: Vorgehen zur Evaluation von Simulationsumgebungen

Zunächst werden Szenarien durchfahren, die zum Vergleich von Simulator und Realfahrzeug dienen. In den Szenarien werden bestimmte Parameter ("KON-Parameter") ermittelt, die für Kontrollierbarkeitsfragestellungen relevant sind. Deren Herleitung wird in Kapitel 4.1.1 beschrieben. Im nächsten Schritt soll beurteilt werden, ob die Simulationsumgebung zur Abbildung von Szenarien bestimmter Kategorien (z.B. Längsführung, Querverkehr) geeignet ist. Abgeleitet aus den in Tabelle 3 auf Seite 38 aufgeführten Validierungsstudien soll ein Zusammenhang zwischen Messdaten aus dem Simulator und dem Realfahrzeug zunächst über die Berechnung von Korrelationen erfolgen (Nachweis relativer Validität gemäß Mullen et al. (2011)). Ist diese hinreichende Voraussetzung erfüllt (wenn "nein" ist die Simulationsumgebung für das Szenario nicht geeignet), wird im zweiten Schritt festgestellt, ob Unterschiede zu finden sind, die nicht auf zufallsbedingte Streuung der Messdaten zurückzuführen sind. Solche Differenzen können gegebenenfalls über Transferfunktionen (siehe Kapitel 4.2) korrigiert werden. Betrag und Richtung der Abweichungen werden über die KON-Parameter bestimmt und sind Voraussetzung zur Korrektur der Daten. Werden hingegen keine signifikanten Unterschiede gefunden, kann die Simulationsumgebung zur Untersuchung des Szenarios uneingeschränkt eingesetzt werden.

4.1.1 Ermittlung der KON-Parameter

Zur Beurteilung der genannten Voraussetzungen für den Einsatz von Simulationsumgebungen sollen zunächst relevante Parameter für Kontrollierbarkeitsfragen identifiziert werden. Dies zielt darauf ab mögliche Unterschiede im Fahrerverhalten sowie die Abweichung von Messergebnissen in Simulationsumgebungen quantifizieren zu können. Die Anforderungen ergeben sich hierbei aus den gängigen Pass-/Fail-Kriterien für solche Untersuchungen. Diese beinhalten objektive Kriterien wie Kollisionen oder Spurverlassen sowie subjektive Ratings der Fahrer. In der Regel werden Pass-/Fail-Kriterien angewandt, um zu beurteilen, ob ein Fahrer eine kritische Fahrsituation während der Interaktion mit einem FAS beherrschen kann. Dazu ist zunächst die Wahrnehmung der Fahrsituation von Bedeutung, die Großteils einen visuellen Vorgang darstellt. Hier können bei Simulationsumgebungen schon die ersten Unterschiede, bedingt durch die verwendeten Visualisierungssysteme zu finden sein (Andersen 2011). Diese haben laut Distler (2003) möglicherweise Einfluss auf die Wahrnehmung von Abständen (vgl. Armbrüster et al. 2005) und Größenänderungen von Objekten (vgl. Beusmans 1998). Letztere dient dem Fahrer zur Einschätzung der Time to Collision (TTC) oder der Time to Arrival (TTA) (Andersen und Sauer 2007). Die TTC ist ausschlaggebend für die Wahrnehmung der Kritikalität bei drohender Kollision durch den Fahrer (Färber 1986). Entsprechend reagiert ein Fahrer dann unterschiedlich schnell und intensiv und regelt abhängig von der Rückmeldung, die er von seinen Sinnesorganen erhält (Schmitt et al. 2007). Aufgrund der erwähnten möglichen Wahrnehmungsunterschiede und bedingt durch fehlende oder andere Rückmeldungen in Simulationsumgebungen (z.B. durch mangelndes vestibuläres, visuelles oder haptisches Feedback), kann eine Fahrerreaktion verändert sein. Aus diesen Überlegungen ergeben sich auch in Anbetracht potentieller Testfälle folgende Parameter, die für Kontrollierbarkeitsuntersuchungen in Simulationsumgebungen bekannt sein sollten:

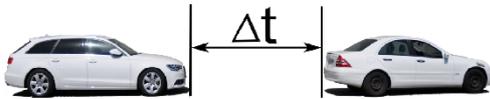
	Wahrnehmung:	Fahrerverhalten
Allgemein:	<ul style="list-style-type: none"> ● Kritikalität ● Time to Collision ● Time to Arrival 	<ul style="list-style-type: none"> ● Reaktionszeiten ● Geschwindigkeitsverhalten
Längsverkehr:	<ul style="list-style-type: none"> ● Längsabstände 	<ul style="list-style-type: none"> ● Brems-/Beschleunigungsverhalten
Querverkehr:	<ul style="list-style-type: none"> ● Querabstände ● Time to Lane Crossing 	<ul style="list-style-type: none"> ● Lenkverhalten

Um diese KON-Parameter (Für die Parameter Time to Arrival und Time to Lane Crossing wurden bisher keine eigenen Szenarien geschaffen, da diese Parameter in den Folgestudien keine Anwendung fanden) für eine Simulationsumgebung ermitteln zu können, werden im Folgenden basale Grundlagenmanöver vorgestellt, die im Rahmen des Förderprojektes UR:BAN (Lehsing et al. 2013) in Kooperation mit dem WIVW entwickelt wurden. Die Manöver bilden Geschwindigkeitsbereiche ab, die im urbanen Verkehr vorzufinden sind. Auch das Spektrum bei aktuellen Entwicklungen aktiver Sicherheitssysteme liegt in diesem Geschwindigkeitsbereich. Alle aufgeführten Manöver wurden als Referenz mit einem Realfahrzeug auf der Teststrecke von Probanden durchfahren. Die Szenarien wurden ebenfalls in einem statischen und einem dynamischen Simulator erhoben. Die Ergebnisse sind teilweise in Purucker et al. (2014) und Rüger et al. (2014) veröffentlicht. Der Versuch und die Ergebnisse aus VIL und Teststrecke werden im Anschluss an die vorgestellten Manöver beschrieben.

Wahrnehmung von Längsabständen

Längsabstände können in Form von Streckenangaben oder Zeitlücken gemessen werden, welche auch als Time Headway (THW) bezeichnet werden. Sie spielen bei der Fahrzeugführung vor allem bei der Einhaltung von Sicherheitsabständen eine Rolle. In Ichikawa (2003) und Piao und McDonald (2003) werden typische Zeitlücken im urbanen Verkehr berichtet, die sich im Mittel zwischen 1.75 s und 2.11 s bewegen. Werte unter einer THW von 0.8 s sind laut Straßenverkehrsordnung als gefährlich einzuordnen (Hentschel et al. 2011). In Colbourn et al. (1978) werden Zeitlücken oberhalb von zwei Sekunden als sicher eingestuft. Dabei ist der Fahrer nur eingeschränkt fähig, Absolut-Abstände in Form von Sekunden- oder Meterangaben zu schätzen oder einzustellen (Färber 1986). Ein möglicher Zugang zum Vergleich von Längsabständen ist deshalb die Einstufung der Kritikalität anhand der Skala zur Bewertung von Fahr- und Verkehrssituationen, SBFV (vgl. Purucker et al. 2014). Deshalb werden basierend auf diesen Literaturangaben und Vorversuchen zum Vergleich von Längsabständen drei Zeitlücken gewählt: 0.75 s, 1.5 s und 2.25 s. Die genannten Zeitlücken werden bei einer Folgefahrt mit 50 km/h hinter einer weißfarbigen Mittelklasse-Limousine (z.B. Mercedes C200, Audi A4, BMW 3er) mit Hilfe eines Versuchsleiters eingestellt. Sobald der Fahrer die gewünschte Zeitlücke konstant erreicht hat, soll er den Abstand unter Beachtung der Instruktionen (Neukum et al. 2013, S. 51-52) auf der SBFV einordnen (siehe Abbildung 20, links).

Zeitlücke bewerten



Zeitlücke herstellen

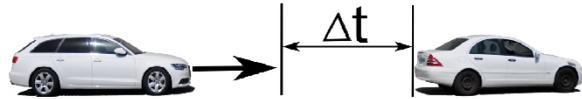


Abbildung 20: Zeitlücke bewerten (ZB, links) und Zeitlücke herstellen (ZH, rechts)

Umgekehrt kann der Versuchsleiter den Fahrer auch anweisen, einen "harmlosen", "unangenehmen" oder "gefährlichen" Abstand hinter der mit konstant 50 km/h fahrenden weißen Mittelklasse-Limousine einzustellen und konstant zu halten (siehe Abbildung 20, rechts). Der entsprechende gemessene Abstand zu diesem Zeitpunkt kann dann zum Vergleich herangezogen werden. Um Reihenfolgeeffekte zu vermeiden werden die beschriebenen Messpunkte gemäß Tabelle 4 variiert.

Tabelle 4: Reihenfolgen für Zeitlücke bewerten (ZB) und herstellen (ZH)

ZB (THW)	R1	0.75 s	2.25 s	1.5 s
	R2	1.5 s	0.75 s	2.25 s
	R3	2.25 s	0.75 s	1.5 s
ZH (SBFV)	R1	harmlos	gefährlich	unangenehm
	R2	unangenehm	gefährlich	harmlos
	R3	gefährlich	harmlos	unangenehm

Wahrnehmung der TTC

Die TTC ist für den Fahrer die relevante Größe für die Wahrnehmung der Kritikalität von Konfliktszenarien und Grundlage für eine adäquate Reaktion (Färber 1986). Aus Feldstudien ist bekannt, dass die TTC im Realverkehr selten unter Werte von 1.5 s fällt, ohne dass ein Unfall beobachtet wird (Dingus et al. 2006). Deshalb soll eine Abschätzung der TTC in Bereichen erfolgen, die dem Fahrer vertraut sind. In Vorversuchen erwiesen sich Zeiten von 1.5 s, 2.0 s und 2.5 s als brauchbare Basis. In einer Versuchssituation, bei der ein Proband mit 50 km/h auf ein stehendes Fahrzeug zufährt (Abbildung 1, Zeitpunkt 1) wird ihm dann bei diesen bestimmten TTCs für genau 3.5 s die Sicht genommen (Abbildung 21, 2-5). Das kann mit Hilfe einer Okklusionsbrille geschehen (vgl. Abbildung 21). Auf der Teststrecke kann das stehende Fahrzeug durch eine maßstabsgetreue, fotorealistische Fahrzeugsilhouette dargestellt werden, die bei einer TTC von 1.0 s weggeklappt wird (Abbildung 21, 3).

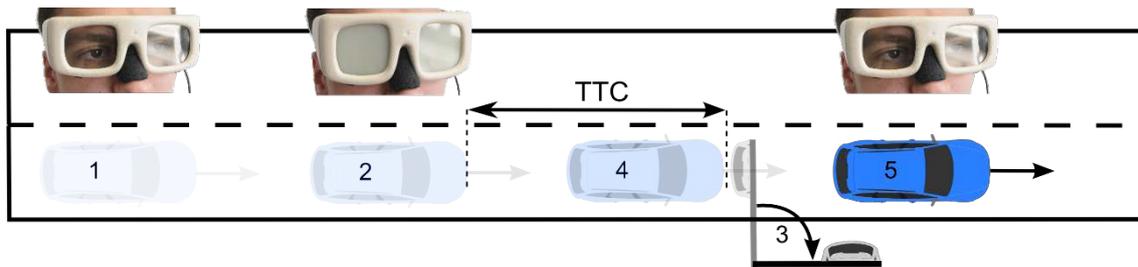


Abbildung 21: TTC - Abschätzen der TTC nach Zeitpunkten (1-5), schematisch

Der Fahrer ist aufgefordert eine Taste am Lenkrad zu drücken, sobald er eine TTC von 0 s, also eine fiktive Kollision annimmt (Abbildung 21, 4). Die vorgeschlagenen Reihenfolgen für die Umsetzung im Versuch sind in Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 5: Reihenfolgen für TTC schätzen (TTC)

TTC	R1	1.5 s	2.5 s	2.0 s
	R2	2.0 s	1.5 s	2.5 s
	R3	2.5 s	1.5 s	2.0 s

Wahrnehmung von Querabständen

Querabstände spielen in vielen Fahrsituationen eine Rolle wie z.B. bei der Wahl der lateralen Spurposition, dem seitlichen Abstand beim Umfahren von Hindernissen oder der Durchfahrt von Engstellen. Während bei Längsszenarien Abstände vor allem durch Erfahrungswissen über die Größe von Objekten geschätzt werden, kann bei Abständen unter 10 m räumliches Sehen eine Rolle spielen (Hebenstreit 1961). Da in Simulationsumgebungen Stereovision nicht immer vorhanden ist, optische Referenzpunkte wie die A-Säule fehlen, oder der räumliche Abstand zu einer Projektions-Leinwand Eindrücke des Nahbereichs verfälschen kann, können Unterschiede in der Wahrnehmung von Querabständen auftreten (Andersen 2011). Törnros (1998) verglich beispielsweise die Spurposition zwischen Realfahrzeug und dynamischem Simulator bei der Durchfahrt eines Straßentunnels und stellt einen Rechtsversatz im Simulator um 13 cm fest. Reichel (2013) untersuchte die Durchfahrt von Engstellen im Realfahrzeug, die durch Balloons markiert wurden. Er stellte in einem iterativen Verfahren die kleinste noch durchfahrene Gassenbreite fest, die in diesem Fall 2.25 m betrug. Die Fahrer bekamen die Sicht auf die Engstelle erst kurz davor ermöglicht und sollten spontan entscheiden, ob sie die Gasse durchfahren oder nicht. Die Fahrbahnbreiten von 2.25 m und 2.75 m wurden von van der Horst (1996) hinsichtlich der Geschwindigkeitswahl untersucht. Wegen der wenig ausgeprägten menschlichen Fähigkeit Entfernungen und Breiten numerisch einzuschätzen,

soll erneut ein Ansatz gewählt werden, bei dem ein Rating anhand der SBFV (siehe dazu Seite 26), kombiniert mit einer Geschwindigkeits- und Spurpositionsmessung erfolgt. Im resultierenden Szenario folgt der Fahrer einem mit 50 km/h vorausfahrenden Fahrzeug auf einer zweistreifigen autobahnähnlichen Fahrbahn mit zusätzlichem Seitenstreifen im Abstand von 1.5 s THW auf dem rechten Fahrstreifen. Fünf Sekunden vor einer Gasse, die symmetrisch um die Mittellinie errichtet ist, blinkt das Vorderfahrzeug, wechselt nach rechts auf den Seitenstreifen und hält an (vgl. Abbildung 22). Der Fahrer hat nun freie Sicht auf die Engstelle und ist angewiesen diese nach einem halben Fahrstreifenwechsel mittig zu durchfahren. Laut Instruktion soll er dabei wenn möglich die Ausgangsgeschwindigkeit beibehalten, kann diese aber reduzieren oder auch vor der Gasse anhalten.

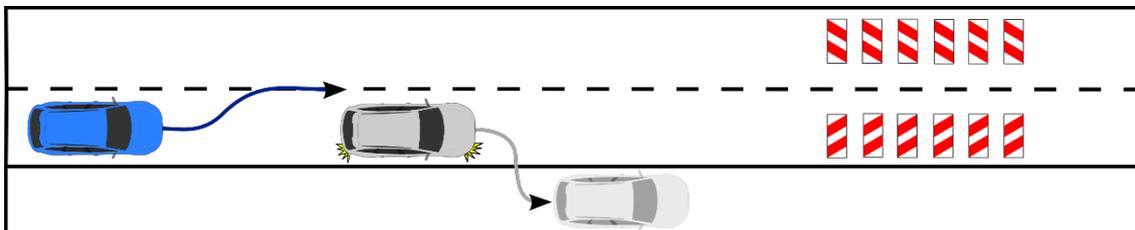


Abbildung 22: Szenario zur Wahrnehmung von Querabständen (GB), schematisch

Die Gasse ist dabei 15 m lang und wird auf jeder Seite von sechs Leitbaken mit einer Höhe von 1 m begrenzt. Als Breiten werden in Anlehnung an die genannten Quellen 2.25 m bzw. 2.75 m und entsprechend gängiger Fahrstreifenbreiten zusätzlich 3.25 m und 3.75 m gewählt. Deren Permutation in verschiedene Reihenfolgen ist in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Reihenfolgen der Gassenbreiten (GB)

GB	R1	2.75 m	2.25 m	3.25 m	3.75 m
	R2	3.25 m	2.75 m	2.25 m	3.75 m
	R3	3.75 m	2.75 m	3.25 m	2.25 m

Verhalten in dynamischen Längsverkehrssituationen

Abhängig von der Wahrnehmung im Längsverkehr bremst oder beschleunigt ein Fahrer sein Fahrzeug. Vor allem die Reaktionszeit und das davon nicht unabhängige Bremsverhalten sind elementar für viele kritische Verkehrssituationen. Während Schöner und Morys (2015) ohne empirischen Beleg von nahezu unveränderten Reaktionszeiten im Simulator berichten, finden sich bei Neukum et al. (2014) verlängerte Reaktionszeiten im Simulator im Vergleich zum Realfahrzeug bei einer Vergleichsuntersuchung. Durch die

längeren Reaktionszeiten bedingt müssen die Fahrer dann auch deutlich stärker auf ein verzögerndes Vorderfahrzeug bremsen, um eine Kollision zu vermeiden. Die in Neukum et al. (2014) im Realfahrzeug untersuchten Verzögerungsintensitäten des Vorderfahrzeuges beliefen sich auf -3 und -6 m/s^2 . In Karl et al. (2013) wurde ebenfalls ein Vergleich von Simulationsumgebung und Realfahrzeug durchgeführt. Dort beschleunigte und verzögerte ein Vorderfahrzeug mit je ± 1 m/s^2 und bremste in einer weiteren Situation mit -3.5 m/s^2 . Die im Straßenverkehr auftretenden Verzögerungen belaufen sich zu 95% auf Werte mit geringerer Beschleunigung als -3 m/s^2 , selten bremsen Fahrer mit Intensitäten von bis zu -5 m/s^2 (Hackenberg und Heißing 1982). Für die Ermittlung der KON-Parameter im Bereich des dynamischen Längsverkehrs wird deshalb eine Folgefahrt hinter einer weißen Mittelklasse-Limousine mit einer Zeitlücke von 1.5 s durchgeführt (siehe Abbildung 23).



Abbildung 23: Vorderfahrzeug verzögert (FV, links) und beschleunigt (FB, rechts)

Dabei folgt immer abwechselnd eine Beschleunigung des Vorderfahrzeuges von 30 auf 50 km/h und auf eine Verzögerung mit umgekehrter Ausgangs-/Zielgeschwindigkeit. Abhängig von den Versuchsreihenfolgen, die in Tabelle 7 dargestellt sind, erlebt der Fahrer die unterschiedlichen Beschleunigungswerte und hat die Aufgabe die Zeitlücke zum Vorderfahrzeug konstant zu halten. Dieser zeitliche Abstand und die Längsbeschleunigung werden auch als abhängige Variable aufgezeichnet sowie die Reaktionszeiten der Fahrer bestimmt. Weitere Hinweise zur Kritikalitätswahrnehmung soll eine Bewertung der Verzögerungsvorgänge anhand der SBFV liefern.

Tabelle 7: Reihenfolgen Folgefahrt mit Beschleunigen (FB) und Verzögern (FV)

FBFV	R1	0.5 m/s^2	-1 m/s^2	2.5 m/s^2	-5 m/s^2	1.5 m/s^2	-3 m/s^2
	R2	1.5 m/s^2	-3 m/s^2	2.5 m/s^2	-1 m/s^2	0.5 m/s^2	-5 m/s^2
	R3	2.5 m/s^2	-1 m/s^2	0.5 m/s^2	-3 m/s^2	1.5 m/s^2	-5 m/s^2
	R4	-1 m/s^2	1.5 m/s^2	-5 m/s^2	2.5 m/s^2	-3 m/s^2	0.5 m/s^2
	R5	-3 m/s^2	1.5 m/s^2	-5 m/s^2	0.5 m/s^2	-1 m/s^2	2.5 m/s^2
	R6	-3 m/s^2	2.5 m/s^2	-1 m/s^2	0.5 m/s^2	-5 m/s^2	1.5 m/s^2

Verhalten in dynamischen Querverkehrssituationen

Als Querverkehr werden Verkehrsteilnehmer bezeichnet, die sich nicht in oder entgegen der Fahrtrichtung eines Fahrers bewegen, sondern mit einem gewissen Bahnwinkel dazu, so dass sich die prädierten Trajektorien schneiden. Abgeleitet aus Unfallstatistiken sind die häufigsten und somit für FAS relevanten Querverkehrsszenarien in Fahrtrichtung von rechts in den Fahrstreifen eindringende Konfliktpartner (Kühn und Hannawald 2015). Abhängig von der TTC und der Anfahrtsgeschwindigkeit des Querverkehrs werden unterschiedliche Reaktionen von Fahrern berichtet, die entweder durch Lenken oder Bremsen - selten auch kombiniert - darauf reagieren, um eine Kollision zu vermeiden (Eckert et al. 2011). Da der Vergleich verschiedener TTC bereits in einem anderen Szenario abgedeckt wurde, soll die Anfahrtsgeschwindigkeit eines von rechts in den Fahrstreifen eindringenden Fahrzeuges variiert werden (vgl. Tabelle 8).

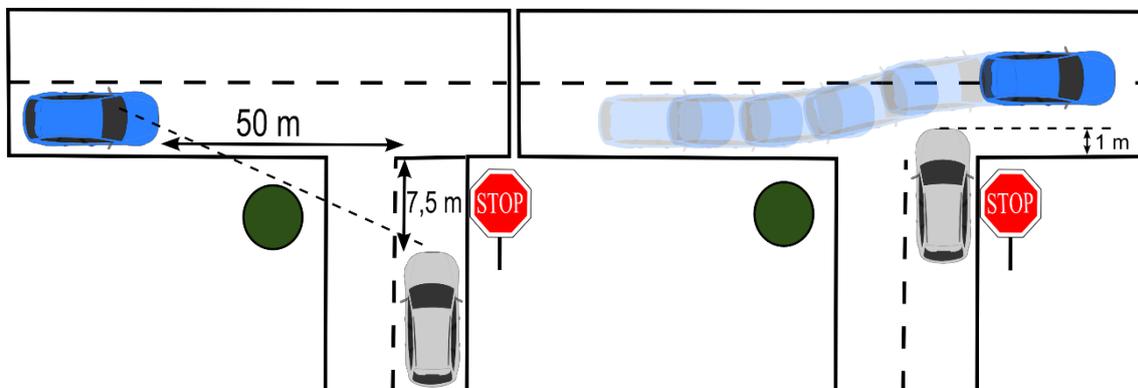


Abbildung 24: Querverkehrsszenario (QV), schematisch

Der Proband hat die Aufgabe möglichst exakt 50 km/h zu halten und fährt in Richtung einer Straßeneinmündung auf der rechten Seite der Fahrbahn. Dabei nähert sich ein Fahrzeug dieser T-Kreuzung mit der jeweiligen Anfahrtsgeschwindigkeit von 10, 30 oder 50 km/h und führt eine Zielbremsung mit einer Intensität von 5 m/s^2 durch, so dass es mit einer Überlappung von einem Meter im Fahrstreifen des Testfahrers stehen bleibt. Aufgrund von Verdeckungen in Form von Büschen am rechten Rand sieht der Fahrer das sich annähernde Fahrzeug erst bei einer Distanz von ca. 50 m zur späteren Halteposition. Dies entspricht in etwa einem zeitlichen Abstand von 3.6 s (vgl. Abbildung 24). Ändert der Fahrer die Ausgangsgeschwindigkeit von 50 km/h nicht, so beträgt der Abstand zur Kreuzung, sobald das Querverkehrsfahrer seine Endposition erreicht, 25 m, was in etwa einer TTC von 1.8 s entspricht. Für die Ermittlung der KON-Parameter werden Lenk- und Bremsaktivität des Fahrers mit den entsprechenden Reaktionszeiten erhoben, sowie eine subjektive Bewertung anhand der SBFV.

Tabelle 8: Reihenfolgen Querverkehr (QV)

QV	R1	10 km/h	50 km/h	30 km/h
	R2	30 km/h	10 km/h	50 km/h
	R3	50 km/h	10 km/h	30 km/h

4.1.2 KON-Parameter für das VIL

Die erste Voraussetzung (vgl. Kapitel 4.1) für den Einsatz einer Simulationsumgebung in Kontrollierbarkeitsuntersuchungen ist die technische Eignung zur Darstellung der untersuchten Assistenzsysteme. Das VIL kann theoretisch in jedes beliebige Fahrzeug mit dem zu untersuchenden FAS integriert werden, wodurch diese Bedingung automatisch gegeben ist. Die zweite Voraussetzung ist der Nachweis validen Fahrerverhaltens in der entsprechenden Simulationsumgebung. Für das VIL erfolgte bereits in Berg (2014) eine Untersuchung der Validität, die für die Prüfumgebung mindestens relative Validität in allen untersuchten Aspekten des Fahrerverhaltens feststellte. Aufgrund von Veränderungen im technischen Setup des VIL wird gemäß Kapitel 4.1 der Nachweis eines Zusammenhangs des Fahrerverhaltens zum Realfahrzeug geführt. Dazu werden die beschriebenen Szenarien zur Ermittlung der KON-Parameter verwendet. Sie dienen gleichzeitig der Erfüllung der dritten Voraussetzung zum Einsatz einer Simulationsumgebung in Kontrollierbarkeitsstudien. Richtung und Betrag möglicher Unterschiede sollen anhand der in Kapitel 4.1.1 vorgestellten Szenarien für das VIL bestimmt werden. Dies ermöglicht eine Korrektur der Daten durch Transferfunktionen, sofern Unterschiede bei Parametern nachgewiesen werden (vgl. Abbildung 19).

Ziel ist es, die vorgestellten Szenarien zwischen VIL und Realfahrzeug zu vergleichen, ohne dass die Daten durch Reihenfolgeeffekte, Lerneffekte oder durch außergewöhnliche Fahrereigenschaften oder weitere äußere Einflüsse verfälscht werden. Dafür wird ein between-subjects- Versuchsdesign gewählt, bei dem jeweils 30 VPn die beschriebenen Situationen im VIL erleben. Eine Stichprobe mit gleicher Größe durchfährt die Szenarien zum Vergleich im Realfahrzeug auf der Teststrecke. Für beide Prüfumgebungen kommt dasselbe Fahrzeug, ein Audi A6 Baureihe C7 zum Einsatz. Dabei werden sowohl alle relevanten Fahrzeugdaten aus CAN und Flexray als auch die Positionsdaten über die DGPS-gestützte Inertialmesseinheit iTrace F200 aufgezeichnet. Die Szenarien der Längswahrnehmung werden im Versuchsplan zu einem thematischen Block zusammengefasst. Die Blöcke sowie die Reihenfolgen innerhalb der einzelnen Szenarien werden systematisch variiert. Im between-Design fährt jeder Fahrer jede Ausprägung der Szenarien nur

einmal. Der gesamte Versuchsplan ist im Anhang A in Tabelle 16 abgedruckt. Alle Probanden hatten mindestens 10.000 km Fahrerfahrung und wurden aus dem Umfeld der Universität der Bundeswehr München ausgewählt. Die Alters- bzw. Geschlechterverteilung der beiden Kollektive ist in Tabelle 9 aufgezeigt und kann als durchaus vergleichbar beschrieben werden. Bei der Fahrerfahrung gaben ca. 90% der Probanden beider Stichproben an, bisher zwischen 100.000 und 300.000 km in ihrem Leben gefahren zu sein.

Tabelle 9: Stichproben-Charakteristika nach Prüfumgebung

	Teststrecke	Vehicle in the Loop
Altersverteilung	Ø 29.2 (+/-10.9) Jahre	Ø 30.4 (+/-10.7) Jahre
Geschlechterverteilung	50% Frauen, 50% Männer	50% Frauen, 50% Männer

Vor der Durchführung der Szenarien gemäß Versuchsplan erfolgte eine Erhebung der Fahrer-Charakteristika anhand des im Anhang B abgedruckten Fahrerfragebogens. Zudem hatten die VPn die Möglichkeit sich mit der jeweiligen Prüfumgebung durch kurze Eingewöhnungsfahrten vertraut zu machen. Die Instruktionen der einzelnen Szenarien, sowie die Fragebögen, die während oder im Anschluss an ein Szenario verwendet wurden, sind ebenfalls im Anhang B zu finden.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der durchfahrenen Szenarien vorgestellt. Der Nachweis relativer Validität wird über Korrelationen geführt. Für intervallskalierte Daten wird der Korrelationskoeffizient nach Pearson, für ordinalskalierte Daten, wie der subjektiven Bewertung anhand der SBFV, die Korrelation nach Spearman berechnet. Für die KON-Parameter sollen neben Mittelwerten auch Verteilungen der Messwerte gegenübergestellt werden. Sinkende Standardabweichungen können z.B. Aufschluss über die Zunahme der Kritikalität einer Situation geben (vgl. Abendroth et al. 2012). Starke Unterschiede bei der Streuung von Daten zwischen VIL und Realfahrzeug können ein Hinweis für Abweichungen im Fahrerverhalten und somit fehlender Validität der Prüfumgebung in diesem Bereich sein. Um diese Verteilungen zu analysieren, bietet sich eine grafische Darstellung der Ergebnisse mit Boxplots an. Bei diesem Diagrammtyp liegen 50 % aller Messwerte (Interquartilsabstand) innerhalb der Box in der zusätzlich der Median als dicker Strich markiert wird. Die Antennen (Whisker) geben den restlichen Streubereich bis maximal dem 1,5-fachen des Interquartilsabstandes an. Darüber hinaus werden Messwerte als Ausreißer markiert (Bortz und Schuster 2010, S. 44). Ausreißer die nach einer z-Transformation Werte von +/- 3.29 über-/unterschreiten werden für die Auswertung nicht in Betracht gezogen (Field 2013, S. 32).

Wahrnehmung von Längsabständen

Die Wahrnehmung von Längsabständen wurde in zwei verschiedenen Szenarien untersucht.

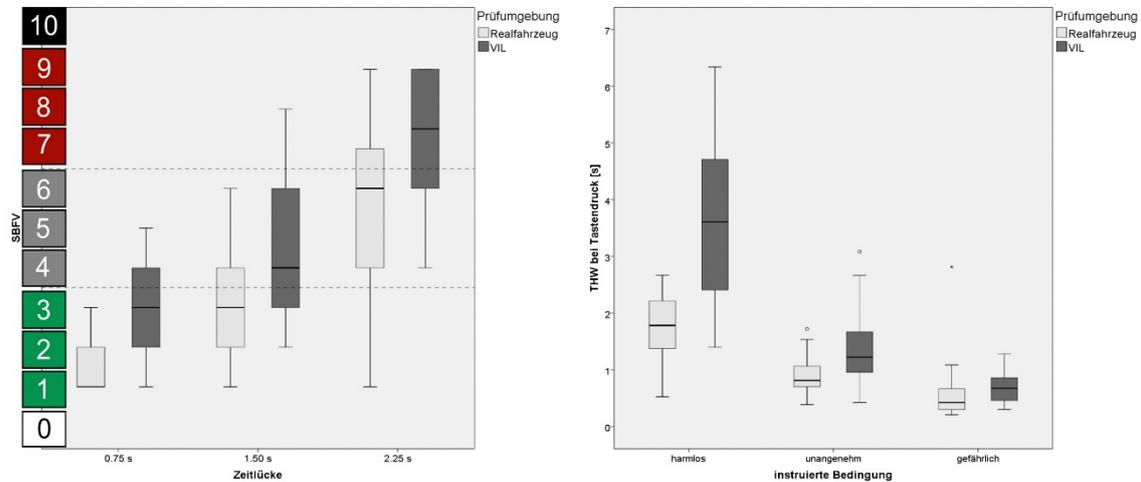


Abbildung 25: ZB - Subjektivurteile (links, $n = 180$) und ZH - THW (rechts, $n = 180$)

Im ersten Szenario (ZB) sollten Probanden eine vom Versuchsleiter instruierte Zeitlücke zum Vorderfahrzeug bewerten. Dabei zeigte sich, wie in Abbildung 25 auf dem linken Boxplot zu sehen, dass im VIL Abstände in jeder Bedingung bedrohlicher wahrgenommen wurden. Dieses Ergebnis bestätigt sich im zweiten Szenario, in dem die Probanden einen harmlosen, unangenehmen oder gefährlichen Abstand herstellen sollten. Sobald sie diesen erreicht hatten, drückten sie eine Taste am Lenkrad und die THW wurde aufgezeichnet. Wie in Abbildung 25 rechts zu sehen, wählten die Fahrer im VIL dabei einen größeren Abstand als im Realfahrzeug. Die Varianz nimmt, mit abnehmender Kritikalität, im VIL wesentlich stärker zu, als im Realfahrzeug.

Zur Überprüfung, ob die Daten trotz der gefundenen Unterschiede zwischen VIL und Realfahrzeug korrelieren, werden Korrelationskoeffizienten berechnet. Da es sich um unabhängige Stichproben handelt, wurden im Vorfeld die Ergebnisse aus beiden Prüfumgebungen aufsteigend sortiert. Eine Berechnung nach Spearman zeigte einen signifikanten Zusammenhang zwischen VIL und Realfahrzeug bezogen auf die SBFV-Urteile der Probanden ($r_s(88) = .967, p < .001$). Auch die gemessene Zeitlücke zum Vorderfahrzeug bei Tastendruck der Probanden korreliert zwischen beiden Prüfumgebungen signifikant ($r(88) = .986, p < .001$).

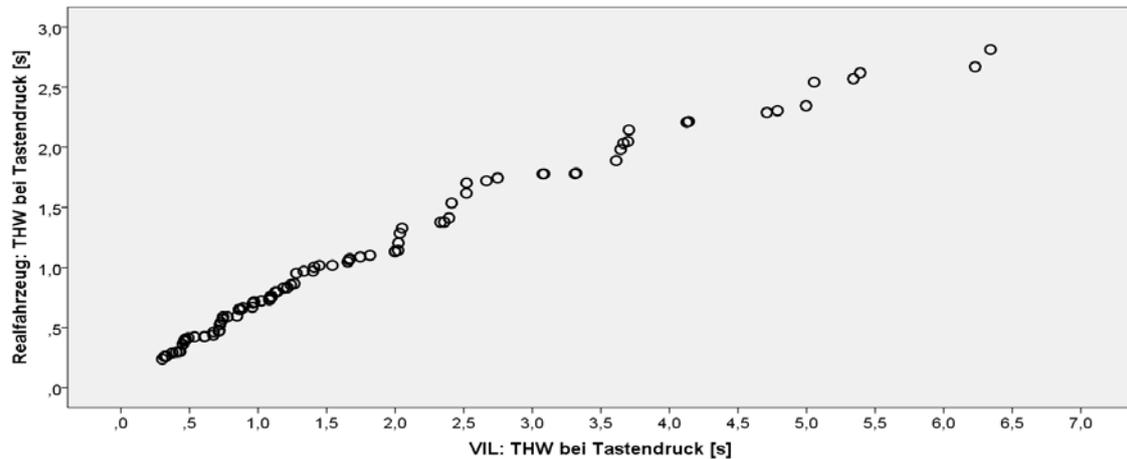


Abbildung 26: Zusammenhang der THW zwischen VIL und Realfahrzeug

Dieser Zusammenhang wird auch bei der Betrachtung von Abbildung 26 deutlich. Hier sind beispielhaft die ermittelten Werte aus VIL und Realfahrzeug in aufsteigender Reihenfolge gegeneinander geplottet. Der deutliche lineare Zusammenhang, der hier vorliegt, spiegelt die hohen Korrelationskoeffizienten wider und bestätigt, dass trotz Unterschieden bei den Mittelwerten und Varianzen zwischen den beiden Prüfumgebungen ein Zusammenhang in der Wahrnehmung von Längsabständen der Fahrer besteht.

Wahrnehmung der TTC

Der Versuchsaufbau zur Abschätzung der TTC ermöglichte es, dem Fahrer bei einer bestimmten TTC zu einem stehenden Fahrzeug die Sicht zu nehmen. In beiden Prüfumgebungen geschah dies durch Überblendung mit einem "Whitescreen", der im Realfahrzeug durch eine Okklusionsbrille erzeugt wurde. Die Probanden sollten abschätzen, wann sie mit einem stehenden Fahrzeug kollidieren würden und zu diesem Zeitpunkt eine Taste am Lenkrad drücken. Um zu verhindern, dass die VPn aus Schreck vor der ungewohnten Ausblendung des Primärsinnes, bei gleichzeitig drohender Kollision, die Taste drücken, war ein Probedurchgang erforderlich. Nach den Versuchsläufen wurden die Probanden gefragt, wie sie die TTC bei Ausblendung der Sicht anhand der SBFV einstufen.

Wie aus den Mittelwerten in Anhang C, Tabelle 20 und dem linken Boxplot in Abbildung 27 deutlich wird, wurden die Zeiten bis zur drohenden Kollision im VIL bedrohlicher wahrgenommen als im Realfahrzeug. Dabei ist in beiden Prüfumgebungen eine hohe Streuung in allen Bedingungen zu beobachten. Bei der Einschätzung der TTC wurde die Zeit von der Aktivierung des Whitescreens bis zum Tastendruck der VPn ermittelt. Dabei zeigt sich zunächst eine größere Streuung mit Zunahme der TTC bei Einblendung des

Whitescreens (vgl. Abbildung 27, rechts). In beiden Prüfungen tendierten Fahrer dazu, die TTC zu gering einzuschätzen.

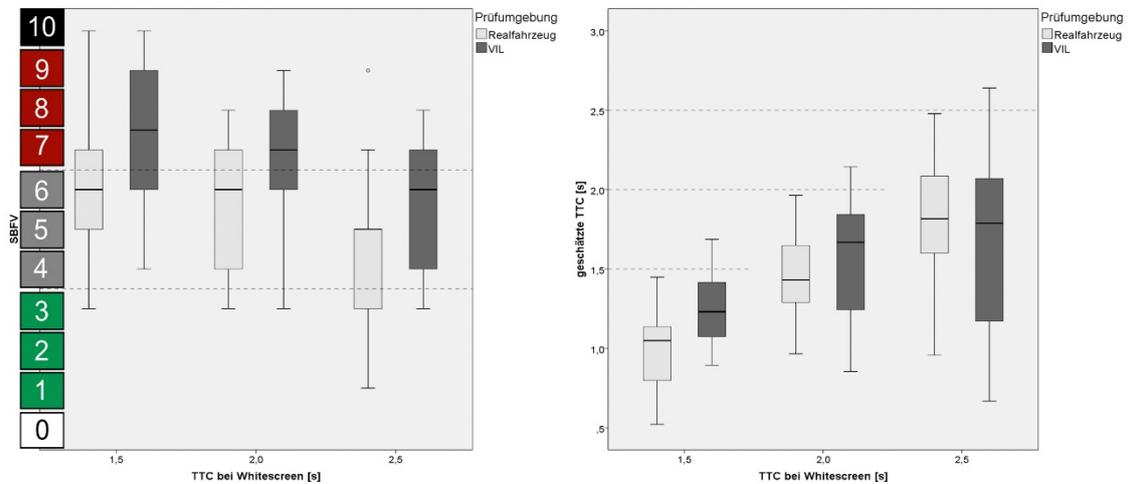


Abbildung 27: TTC - Subjektivurteil (links, $n = 180$) und Schätzung (rechts, $n = 180$)

Während der Tastendruck bei kleinen TTC im VIL etwas näher am fiktiven Hindernis erfolgte, ist der Unterschied bei zunehmenden TTC geringer. Bei einer TTC von 2,5 s liegen die Mediane nahezu gleichauf (vgl. Abbildung 27, rechts). Es besteht ein fast linearer Zusammenhang bei der Einschätzung der TTC zwischen beiden Prüfungen, wie aus dem Plot in Abbildung 28 und den berechneten Korrelationskoeffizienten in Anhang C, Tabelle 20 deutlich wird.

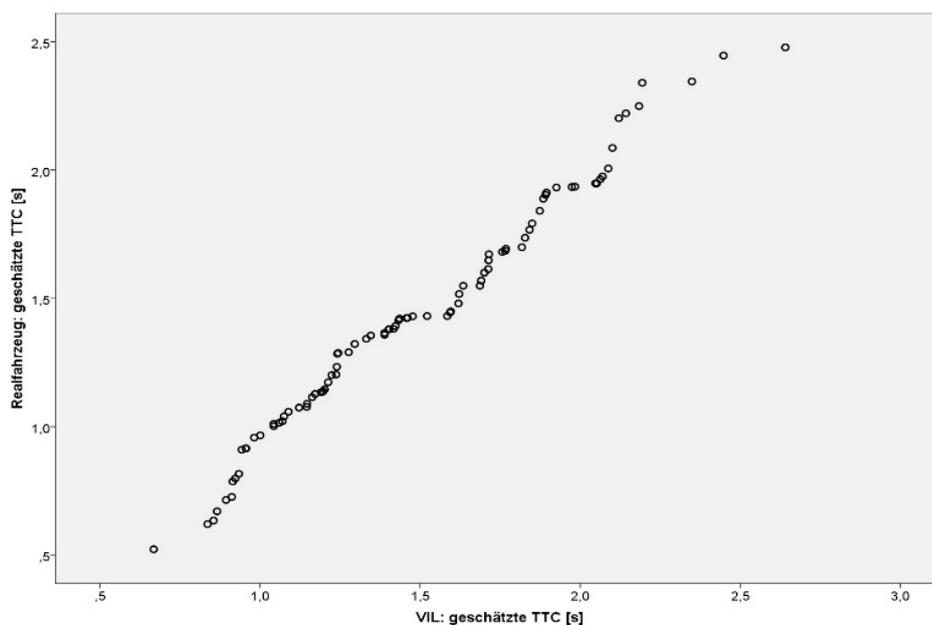


Abbildung 28: Zusammenhang der TTC zwischen VIL und Realfahrzeug

Wahrnehmung von Querabständen

Im Szenario zur Untersuchung der Wahrnehmung von Querabständen mussten Probanden einem Vorderfahrzeug folgen, bis dieses auf den Seitenstreifen abbog und somit den Blick auf Engstellen unterschiedlicher Breite öffnete, die die VPn durchfahren sollten. Dabei wurde zunächst überprüft, ob die Fahrer, sobald ihnen der Blick auf die Gasse eröffnet wurde, die gewünschte Ausgangsgeschwindigkeit von 50 km/h mit einer Toleranz von 5 km/h einhielten. War dies nicht der Fall, wurden die zugehörigen Daten von der Auswertung ausgeschlossen. Als abhängige Variablen wurden die Geschwindigkeit bei Gasseneinfahrt sowie mittlerer und maximaler Spurversatz innerhalb der Gasse und das Subjektivurteil anhand der SBFV ausgewertet. Die subjektiven Ratings der Probanden fallen im VIL, außer bei der Gassenbreite 2.25 m, höher aus (vgl. Anhang C, Tabelle 21). Die Urteile könnten bei dieser Ausnahme im Realfahrzeug aber durch eine direkte Rückmeldung von Kollisionen mit den Leitbaken beeinflusst sein. Letztere wurde detektiert, wenn die maximale Spurabweichung größer war als die jeweilige Toleranz, die sich aus der Hälfte der Differenz zwischen Gassen- und Fahrzeugbreite ergibt und in Abbildung 30 rechts durch transparente Leitbaken visualisiert wird. Auf der Teststrecke waren solche Kollisionen nur bei der engsten Gasse vorzufinden, wobei der Fahrer bei einem Kontakt mit den Styropor-Leitbaken deutlich ein Geräusch und meist auch deren Abknicken beobachten konnte. Im VIL bekam der Fahrer bei einer Kollision keinerlei Rückmeldung, sondern fuhr einfach durch die Leitbaken hindurch.

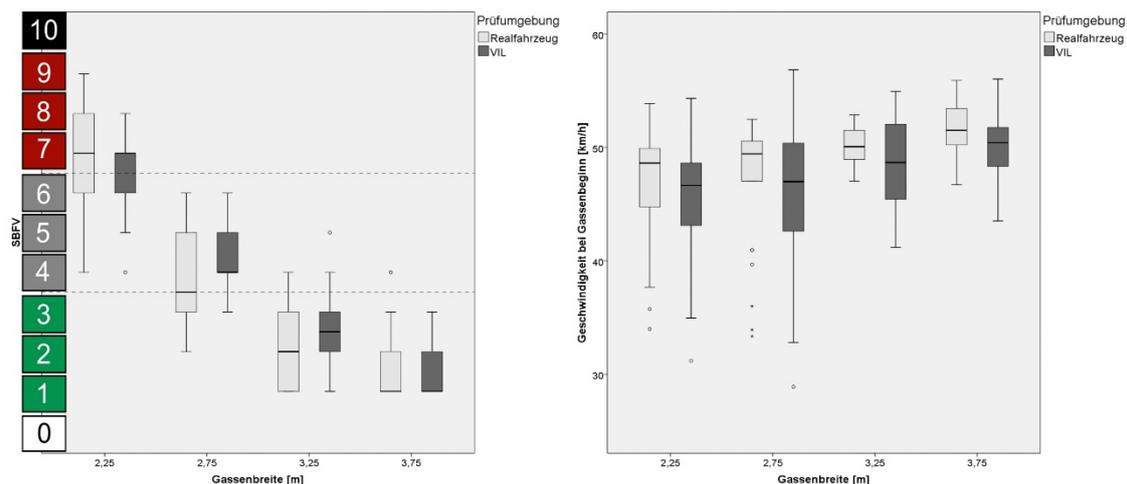


Abbildung 29: GB - Subjektivurteile (links, $n = 240$) und Gasseneinfahrtsgeschwindigkeit (rechts, $n = 240$)

Passend zu den erhöhten Wahrnehmungen der Kritikalität senkten die Fahrer im VIL ihre Geschwindigkeit etwas mehr als im Realfahrzeug, bevor sie in die Gasse einfuhren (vgl.

Anhang C, Tabelle 21). Aus dem rechten Boxplot in Abbildung 29 wird deutlich, dass die Werte im VIL dabei etwas mehr streuen als im Realfahrzeug, vor allem bei sinkender Gassenbreite.

Die Spurabweichung wurde, ausgehend von einer Idealtrajektorie, entlang der Gassenmitte ermittelt. Dabei wurden Abweichungen in Fahrtrichtung zur linken Seite mit einem negativem, zur rechten Seite mit positivem Vorzeichen versehen. Bei der maximalen Spurabweichung innerhalb der Gasse wurden für die Mittelwerte Beträge gebildet (siehe Anhang C, Tabelle 22). Es zeigte sich, dass Fahrer im VIL mit abnehmender Gassenbreite im Mittel zunehmend weiter rechts von der Ideallinie fahren. In Abbildung 30 sind die ohne Kollision möglichen Abweichungen als Toleranzgrenzen durch transparente Leitbaken in den Boxplot eingefügt. Sobald die maximale Spurabweichung einer VPn innerhalb der Gasse diese Grenzen überschritten hatte, hatte dies in der Regel eine Kollision mit einer Leitbake zur Folge. Im Realfahrzeug kollidierten sieben von 30 VPn mit einer Leitbake bei der Bedingung 2.25 m und eine VP bei 2.75 m. Im VIL wurden 28 bei 2.25 m und sechs Kollisionen bei 2.75 m Gassenbreite registriert. Fast alle Kollisionen ereigneten sich mit Leitbaken der rechten Gassenseite, wie aus Abbildung 30 zu entnehmen ist. Dieser Rechtsversatz vergrößerte sich mit enger werdenden Gassen, wobei er im VIL wesentlich deutlicher ausgeprägt war, als im Realfahrzeug.

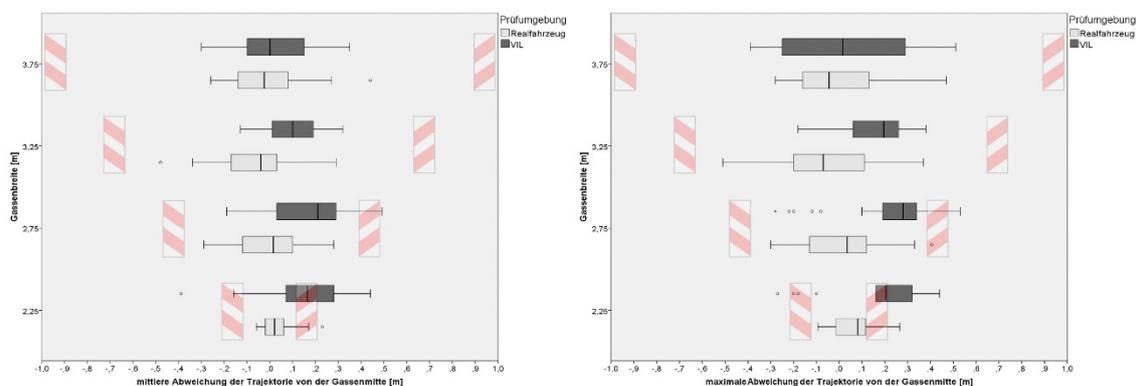


Abbildung 30: GB - mittlere (links, $n = 240$) und maximale (rechts, $n = 240$) Spurabweichung in der Gasse

Im selben Verfahren wie im Bereich der Längs-Wahrnehmung wurden auch für die hier vorgestellten Variablen Korrelationen berechnet. Bei allen Variablen ergaben sich signifikante Zusammenhänge zwischen Realfahrzeug und VIL. Die zugehörigen Korrelationskoeffizienten sind in den Tabelle 21 und Tabelle 22 (beide in Anhang C) aufgeführt.

Exemplarisch werden in Abbildung 31 die Werte aus VIL und Realfahrzeug für die Einfahrtsgeschwindigkeit in die Gasse und die laterale Abweichung von der Ideallinie aufgeführt.

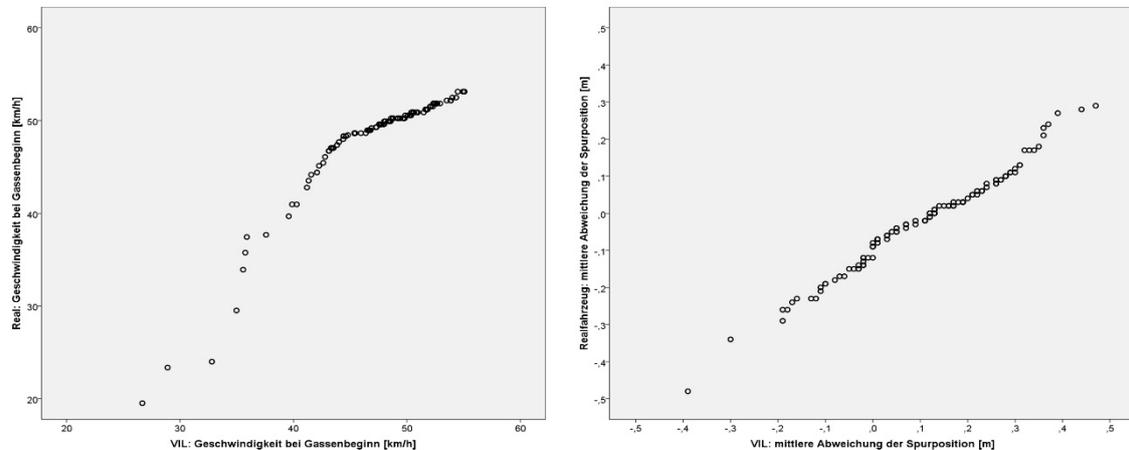


Abbildung 31: Zusammenhang von Einfahrtsgeschwindigkeit (links) und Spurposition (rechts) zwischen Realfahrzeug und VIL

Bei beiden Variablen wird ein fast linearer Zusammenhang deutlich, der durch die Ergebnisse der statistischen Verfahren gestützt wird.

Verhalten in dynamischen Längsverkehrssituationen

Zur Untersuchung des Fahrerverhaltens im dynamischen Längsverkehr folgten die Probanden einem Vorderfahrzeug (auch als "Target Object" (TO) bezeichnet) mit einer Zeitlücke von 1.5 s. Diese wurde vom Versuchsleiter instruiert und überwacht. Sobald der Fahrer den Abstand eingependelt hatte, löste der Versuchsleiter abwechselnd ein Brems- bzw. Beschleunigungsmanöver des Vorderfahrzeuges mit unterschiedlicher Intensität aus. Bei den Bremsmanövern des Vorderfahrzeuges leuchteten bei den Bedingungen -3 m/s^2 und -5 m/s^2 die Bremslichter auf, während bei der Bedingung -1 m/s^2 die Verzögerung durch die Motorbremse erreicht wurde. Die Versuchspersonen waren aufgefordert den Abstand zum Vorderfahrzeug möglichst konstant zu halten und sollten nach jedem Manöver ihr subjektives Urteil anhand der SBFV abgeben. Dabei zeigte sich, wie in Abbildung 32 zu sehen und gleichermaßen in Anhang C, Tabelle 23 nachzuvollziehen, dass die Verzögerungsmanöver kaum als "gefährlich" beurteilt werden und sich im Mittel zwischen "harmlos" und "unangenehm" bewegen. Mit den höheren Verzögerungsintensitäten nehmen in beiden Prüfumgebungen die Ratings höhere Werte an, obgleich Probanden im VIL zu kritischeren Beurteilungen tendieren. Der Korrelationskoeffizient nach Spearman

zeigt einen signifikanten Zusammenhang der Urteile in beiden Prüfungsumgebungen (vgl. Anhang C, Tabelle 23).

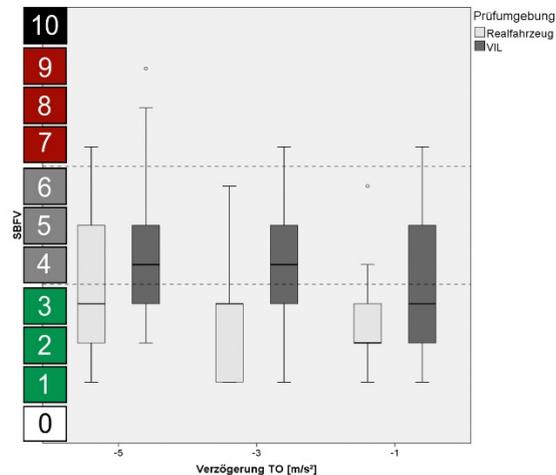


Abbildung 32: FV - Subjektivurteile ($n = 180$)

Die Reaktionszeit wurde ab Verzögerungsbeginn des Vorderfahrzeuges bis zur Betätigung des Bremspedals durch den Fahrer bestimmt. In Anhang C, Tabelle 23 sind die Mittelwerte dieser Reaktionszeiten und der maximalen Verzögerung, die während des Bremsvorganges gemessen wurde, aufgeführt. Bei den Reaktionszeiten zeigt sich, dass die Fahrer mit steigender Intensität der Verzögerung des Vorderfahrzeuges schneller reagierten, wobei die Fahrer im VIL bei jeder Bedingung längere Zeiten bis zur Reaktion benötigten. Vor allem in der Bedingung -1 m/s^2 , bei der am Vorderfahrzeug keine Bremslichter aufleuchteten, wurde dieser Unterschied extrem deutlich (vgl. Abbildung 33, links).

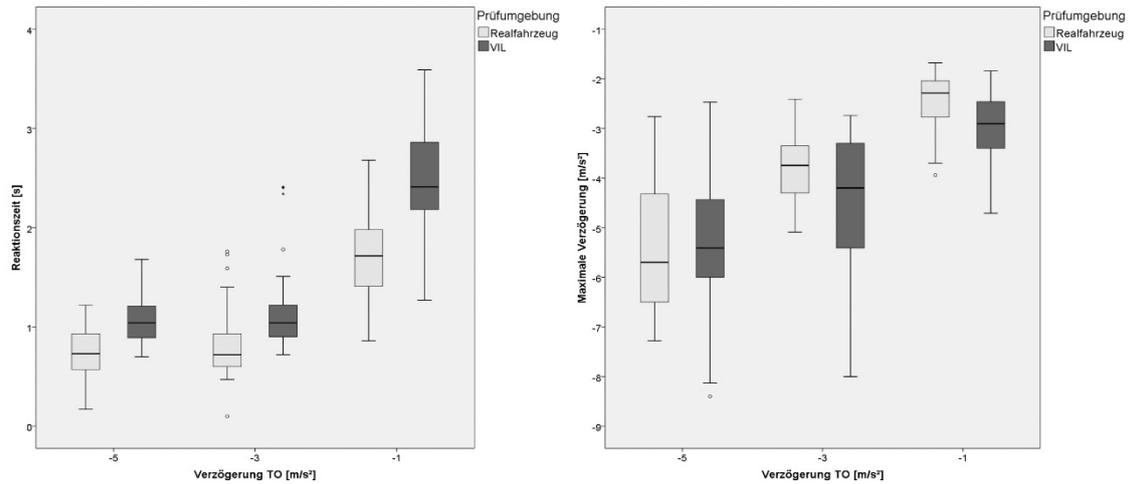


Abbildung 33: FV - Reaktionszeit (links, $n = 180$) und maximale Verzögerung (rechts, $n = 180$)

Die maximale Verzögerung, die vom Fahrer durch Bremsen hervorgerufen wird, stieg ebenfalls mit zunehmender Verzögerungsstärke des Vorderfahrzeuges. Auch hier lagen die beobachteten Werte zwischen VIL und Realfahrzeug mit sinkender Intensität weiter auseinander, wobei die Fahrer im VIL etwas höhere Verzögerungen bewirkten. Nichtsdestotrotz wird bei einer Gegenüberstellung der Werte in Abbildung 34 sowohl bei den Reaktionszeiten, als auch bei der maximalen Verzögerung ein fast linearer Zusammenhang deutlich. Dieser wird durch die Korrelationskoeffizienten (vgl. Anhang C, Tabelle 23) gestützt.

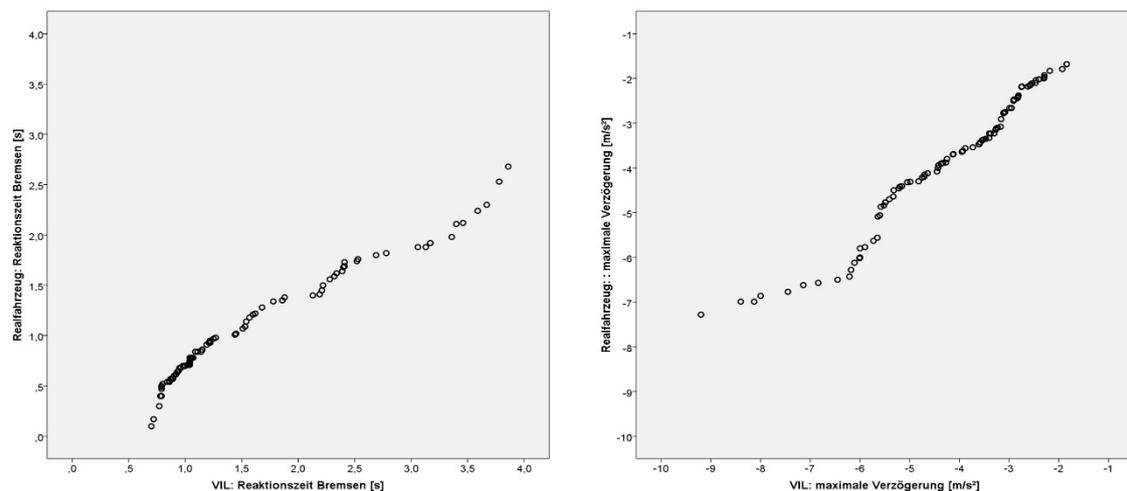


Abbildung 34: Zusammenhang der Reaktionszeit (links) und der maximalen Verzögerung (rechts) zwischen Realfahrzeug und VIL

Bei den Beschleunigungsmanövern wurden die maximale Beschleunigung und die Reaktionszeit des Fahrers ausgewertet. Letztere wurde ab Beginn der Beschleunigung des Vor-

derfahrzeuges bis zur Detektion eines Anstiegs des Fahrpedalgradienten über 0.1/s bestimmt, wobei das Fahrpedal beim Wert 1 bis zum Anschlag durchgetreten ist. Je nachdem, wie sehr der Fahrer das Fahrpedal betätigte, resultierte das in einer Beschleunigung in Längsrichtung, deren Maximalwert während des Manövers ermittelt wurde.

In Abbildung 35 links wird ersichtlich, dass auch beim Beschleunigungs-Manöver die Reaktionszeiten mit zunehmender Intensität geringer wurden, wobei auch hier im VIL verlängerte Zeiten zu beobachten waren (vgl. auch die Mittelwerte in Anhang C, Tabelle 24). Eine Zunahme der Streuung mit sinkender Beschleunigungsintensität des Vorderfahrzeuges war ebenfalls in beiden Prüfumgebungen zu beobachten, aber auch dieser Effekt kam im VIL deutlich ausgeprägter zum Vorschein.

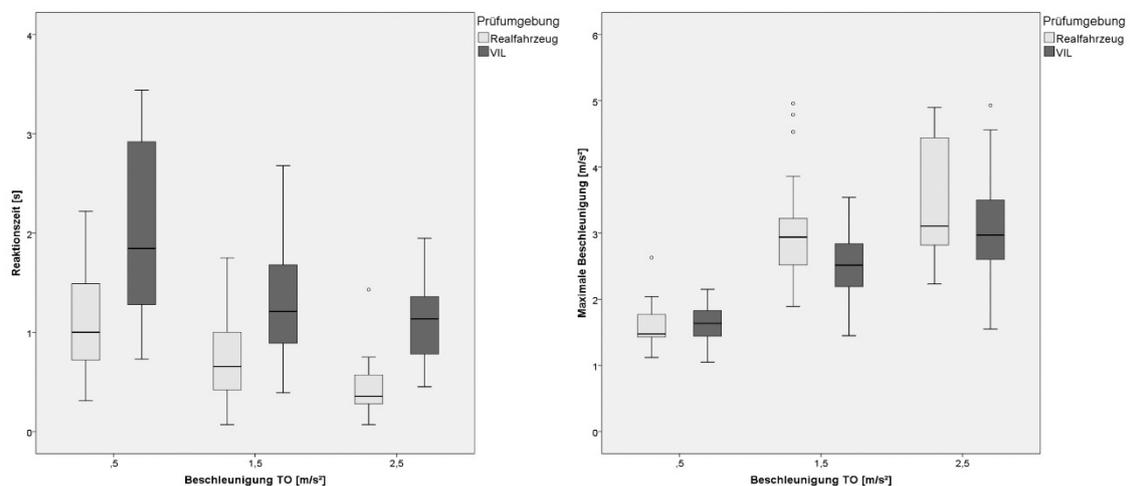


Abbildung 35: FB - Reaktionszeit (links, $n = 180$) und maximale Beschleunigung (rechts, $n = 180$)

Die maximale Beschleunigung während des Manövers war (Abbildung 35, rechts) aber auf sehr ähnlichem Niveau zwischen beiden Prüfumgebungen. Hier nahm die Streuung mit zunehmender Intensität der Beschleunigungen des Vorderfahrzeuges zu, wobei sie in VIL und Realfahrzeug ähnliche Dimensionen annahm. Mit Ausnahme weniger Ausreißer (Abbildung 36, rechts), die die volle Performanz des Versuchsträgers ausgereizt hatten anstatt situationsadäquat zu beschleunigen, zeigen sich sowohl bei der maximalen Beschleunigung als auch bei der Reaktionszeit signifikante Zusammenhänge zwischen Realfahrzeug und VIL (vgl. Anhang C, Tabelle 24, letzte Zeile). Wie in Abbildung 36 zu erkennen ist, streuen die Werte um eine Gerade, weshalb ein linearer Zusammenhang angenommen werden kann.

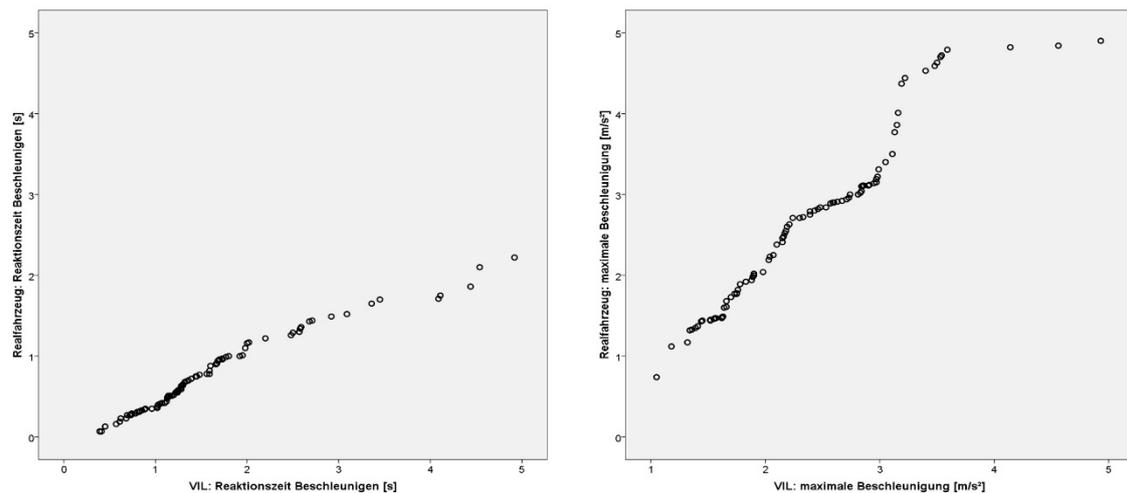


Abbildung 36: FB - Zusammenhang von Reaktionszeit (links) und maximaler Beschleunigung (rechts) zwischen VIL und Realfahrzeug

Verhalten in dynamischen Querverkehrssituationen

Die Evaluation des Fahrerverhaltens in Fahrsituationen zur Bewertung der Querdynamik konfrontierte den Fahrer, in Anlehnung an spätere Assistenzszenarien für Ausweichsysteme, mit einem querenden Fahrzeug von rechts. Dieses Fahrzeug, auch als Target Object (TO) bezeichnet, näherte sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten einer T-Kreuzung und führte eine Zielbremsung aus. Dabei kam es einen Meter von rechts innerhalb des Vorfahrt-berechtigten Fahrstreifens, dem der Proband folgte, zum Stehen. Auf der Teststrecke wurde das TO von einem hochtrainierten Fahrer bewegt, der über ein akustisches Signal zum Losfahren aufgefordert wurde, sobald der Proband eine im Vorfeld ermittelte Stelle passierte. Der Beschleunigungsvorgang wurde über Tempomat möglichst automatisiert ausgeführt. Eine kleine Streuung bei der Zielbremsung (< 0.1 m) und dem Timing (< 0.3 s) ließ sich dennoch nicht gänzlich verhindern. Das Szenario war so parametrisiert, dass der Fahrer eine Kollision durch ein Brems- oder Ausweichmanöver weitgehend unkritisch lösen konnte. Da die Manöverwahl sehr unterschiedliche Verhaltensmuster zum Vorschein ruft, wird bei der Auswertung zwischen zwei Fahrergruppen separiert. Zum einen die "Ausweicher", die alle Fahrer umfasst, die das Hindernis passieren, zum anderen die "Bremsler", die vor dem Hindernis zum Stehen kamen.

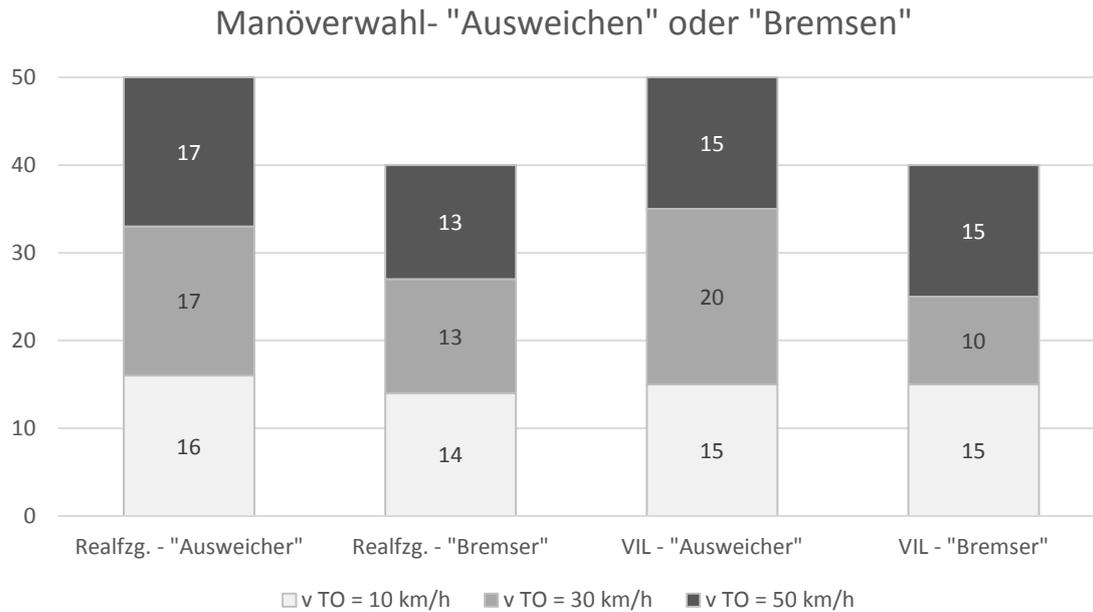


Abbildung 37: QV - Manöverwahl ($n = 180$)

In Abbildung 37 sind diese Gruppen getrennt nach Prüfumgebung und unterteilt in die verschiedenen Versuchsbedingungen dargestellt. Während die Anzahl der "Bremsen" und "Ausweicher" je nach Anfahrtsgeschwindigkeit des TO leicht schwankte, waren im VIL und Realfahrzeug die Verhältnisse zwischen den beiden Manövern gleich.

Die subjektive Beurteilung der Querverkehrssituation erfolgte direkt im Anschluss an jede Fahrsituation und bewegte sich weitgehend unabhängig von der Manöverwahl auf ähnlichem Niveau. Die wahrgenommene Kritikalität steigt dabei mit zunehmender Anfahrtsgeschwindigkeit des Querverkehrsfahrzeugs (siehe Abbildung 38).

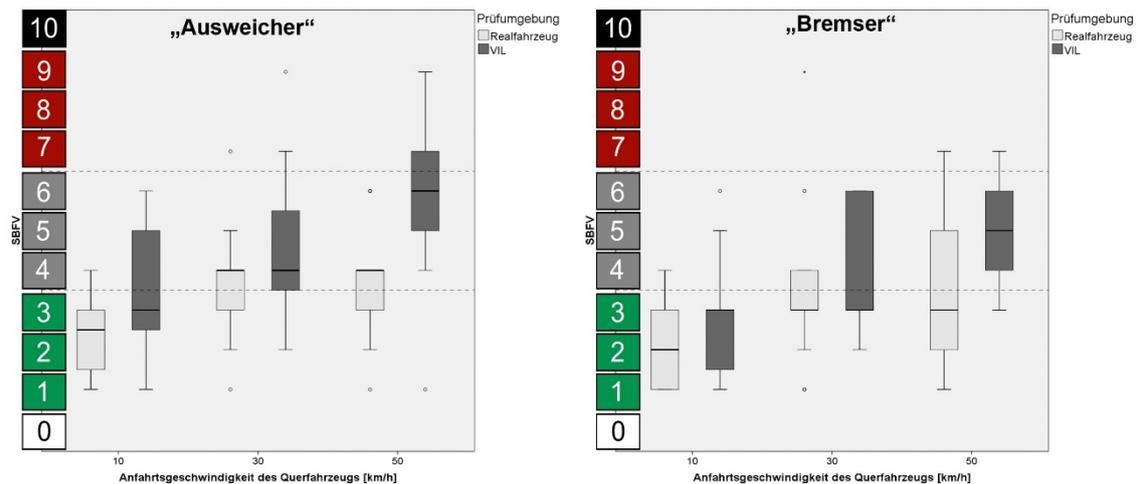


Abbildung 38: QV - SBFV-Urteil bei "Ausweichern" ($n = 100$) und "Bremsern" ($n = 80$)

Wie aus der deskriptiven Statistik in Anhang C, Tabelle 25 deutlich wird, fielen die SBFV-Urteile im VIL höher aus als im Realfahrzeug. Einen signifikanten Zusammenhang zwischen beiden Prüfumgebungen bei der subjektiven Beurteilung durch die Fahrer ergeben Korrelationen nach Spearman (vgl. Anhang C, Tabelle 25).

Der minimale Abstand zwischen beiden beteiligten Fahrzeugen wurde euklidisch zwischen den Außenhüllen unter Vernachlässigung der Außenspiegel bestimmt. Wählten die Probanden ein Ausweichmanöver, so war dieser Abstand in der Regel der laterale Abstand zum Querfahrzeug, bei einem Bremsmanöver in den Stillstand dagegen der frontale Abstand in Fahrtrichtung. Die Fahrer kamen je nach Bedingung bei einem Bremsmanöver im Mittel zwischen 13 und 20 Metern vor dem querenden Fahrzeug zum Stehen (vgl. Anhang C, Tabelle 26). Zwischen VIL und Realfahrzeug wurden hier nur geringe Unterschiede im Vergleich der Mittelwerte und bei den Standardabweichungen beobachtet.

Wählten Fahrer ein Ausweichmanöver, umfuhren sie das Querfahrzeug im Mittel mit einem Abstand von ca. 2.0 m im VIL und 2.4 m im Realfahrzeug. Die Werte waren sowohl im Vergleich der Mittelwerte als auch in der Verteilung hinsichtlich der variierten Anfahrtschwindigkeiten des Querfahrzeuges kaum unterschiedlich. Wie in Abbildung 39 links zu sehen, ergab sich insgesamt ein sehr einheitliches Bild, bei dem die Prüfumgebung und die Bedingung kaum Unterschiede bewirkten. Bei den "Bremsern" nahm der minimale Abstand zum TO mit zunehmender Anfahrtschwindigkeit des Querfahrzeuges leicht ab, aber auch hier sind nur geringe Unterschiede, auch in Bezug auf die Prüfumgebung, zu sehen (vgl. Abbildung 39, rechts).

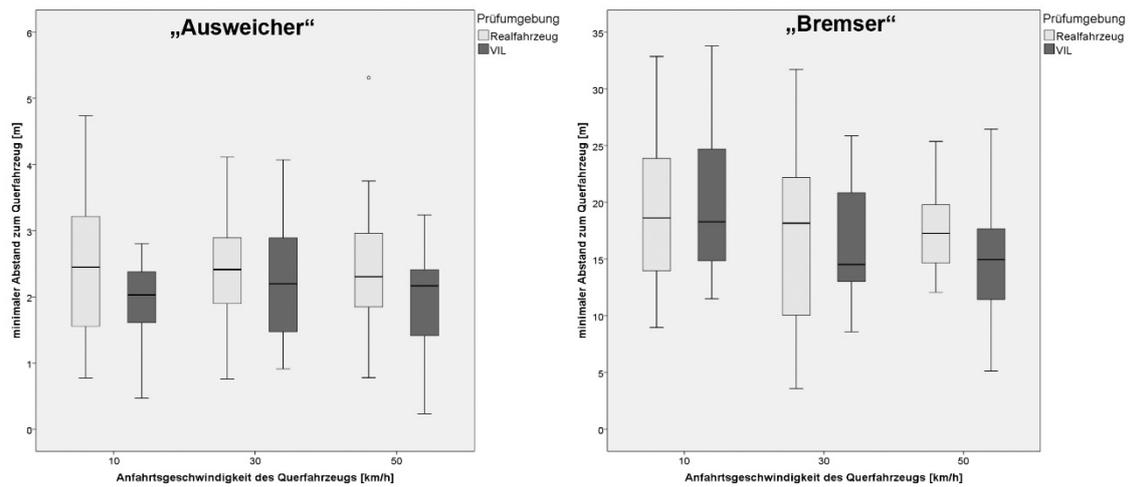


Abbildung 39: QV - minimaler Abstand zum Querverfahrzeug bei "Ausweichen" ($n = 100$) und "Bremsen" ($n = 80$)

Bei beiden Verhaltensmustern korrelieren die minimalen Abstände signifikant zwischen VIL und Realfahrzeug (vgl. Anhang C, Tabelle 26). Aus Abbildung 40 lässt sich eine Streuung der Werte um eine Gerade erkennen, was für einen linearen Zusammenhang spricht.

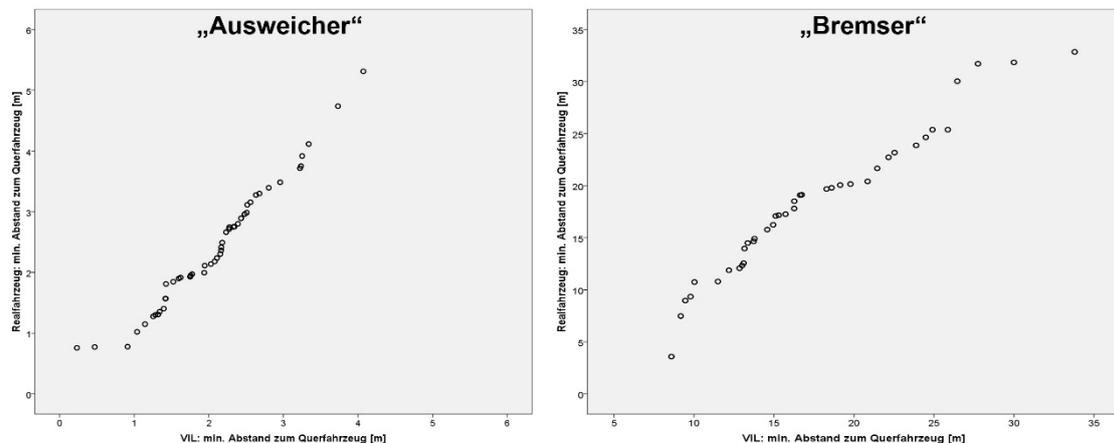


Abbildung 40: Zusammenhang zwischen VIL und Realfahrzeug beim minimalen Abstand zum Querverfahrzeug, aufgeteilt nach Manöver

Um die Handlungen näher zu charakterisieren, die zu den vorgestellten Abständen führten, wird zunächst die Reaktionszeit der Probanden betrachtet. Diese wurde ausgehend vom Zeitpunkt des ersten möglichen Sichtkontaktes mit dem querenden Fahrzeug bestimmt. Wenn die Fahrer das Bremspedal betätigten, wurde dieser Zeitpunkt als Reaktionszeit gewertet, bei einem Lenkmanöver diente ein Lenkradwinkel über 10° als Indikator für den Beginn einer Reaktion. Erfolgte eine kombinierte Reaktion, wurde die kürzere von beiden ermittelten Reaktionszeiten gewertet. Wie in Abbildung 41 zu sehen, waren

die Reaktionszeiten über die Bedingungen hinweg weitgehend konstant, bei den Bremsern nahm nur die Varianz mit steigender Anfahrtsgeschwindigkeit ab. Generell wies die Gruppe "Ausweicher" längere Reaktionszeiten und eine größere Streuung als die "Bremser" auf. Die mittleren Reaktionszeiten im VIL sind minimal länger als im Realfahrzeug (Abbildung 41), wobei keine deutliche Veränderung aufgrund der Anfahrtsgeschwindigkeit des Querverkehrs erkennbar ist.

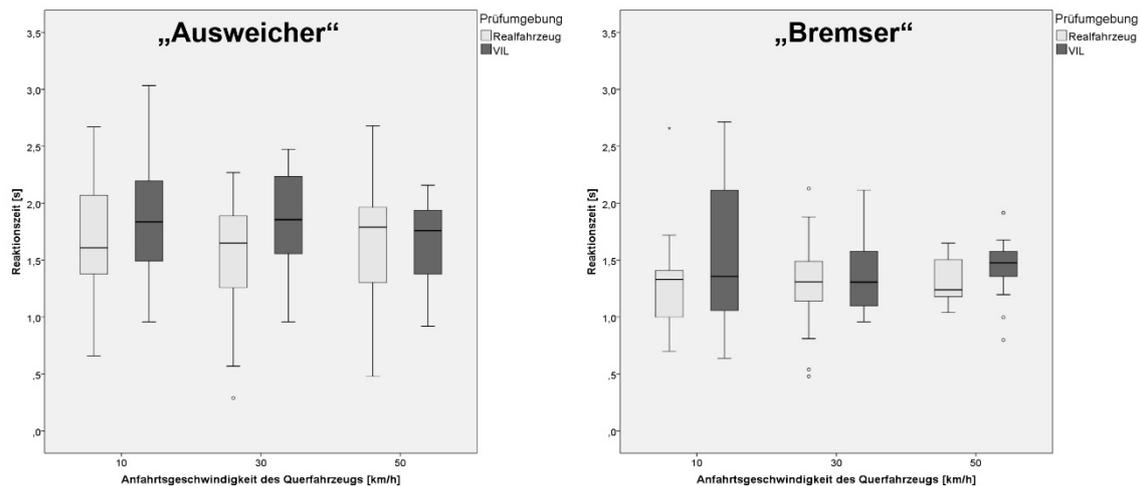


Abbildung 41: QV - Reaktionszeiten bei "Ausweichern" ($n = 100$) und "Bremsern" ($n = 80$)

Einen signifikanten Zusammenhang der Reaktionszeiten zwischen VIL und Realfahrzeug bestätigen die Korrelationskoeffizienten in Anhang C,

Tabelle 27. Die geplotteten Werte in Abbildung 42 streuen entlang einer fiktiven Geraden, was auf einen linearen Zusammenhang zwischen den Reaktionszeiten deuten lässt.

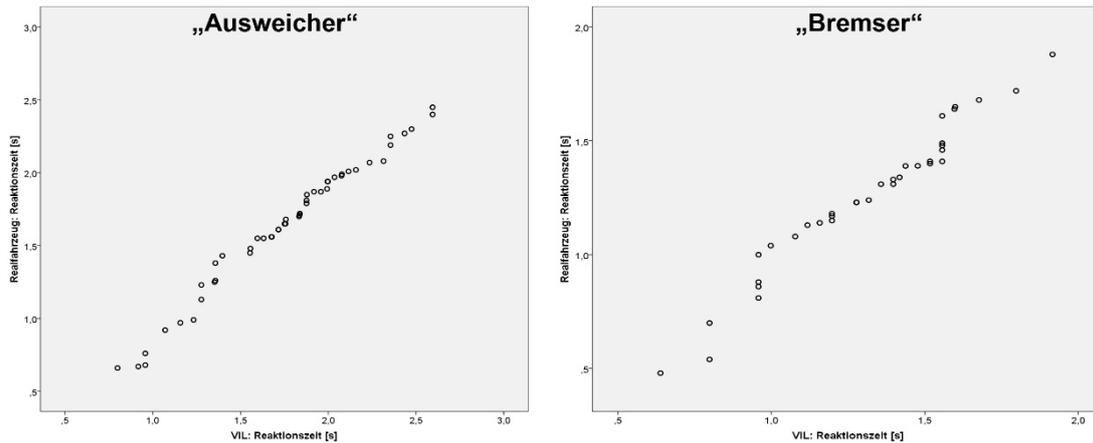


Abbildung 42: Zusammenhang der Reaktionszeiten zwischen VIL und Realfahrzeug bei "Ausweichen" und "Bremsen"

Eine der beiden möglichen Fahrerreaktionen, die bei diesem Szenario beobachtet wurde, ist die Betätigung der Betriebsbremse. In diesem Zusammenhang wurde als die fahrzeug-unabhängige Messgröße die negative Beschleunigung, also die Verzögerung gemessen. Charakteristisch für die Intensität eines Bremsmanövers ist dabei die maximal auftretende Verzögerung. Diese nahm zunächst, wie in Abbildung 43 zu sehen, mit zunehmender Anfahrtschwindigkeit zu, d.h. die Fahrer bremsen stärker. Bei der Gruppe "Bremsen" traten dabei im Mittel Verzögerungen von bis zu -6.5 m/s^2 auf (vgl. Anhang C, Tabelle 28).

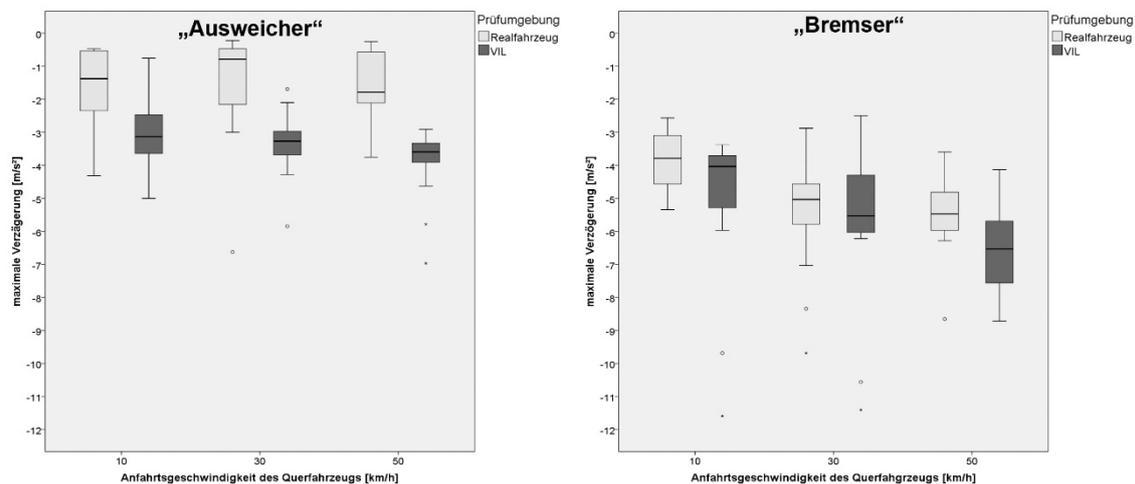


Abbildung 43: QV - Maximale Verzögerung bei "Ausweichen" ($n = 100$) und "Bremsen" ($n = 80$)

Im VIL bremsen die Fahrer stärker als im Realfahrzeug, was vor allem bei der Bedingung 50 km/h deutlich wurde (vgl. Abbildung 43, rechts). Fahrer, die sich für ein Ausweichmanöver entschieden verringerten gleichzeitig die Geschwindigkeit. Während das im Realfahrzeug, wie in Abbildung 43 links zu sehen, oft durch den mechanischen Widerstand

des Motors beim Loslassen des Fahrpedals geschah, waren die beobachteten Verzögerungsintensitäten im VIL im Mittel nur durch aktive Bremsvorgänge zu realisieren. Hierbei unterschieden sich die Werte in beiden Prüfumgebungen zwischen den drei untersuchten Anfahrtschwindigkeiten kaum.

Korrelationen ergeben einen signifikanten Zusammenhang zwischen VIL und Realfahrzeug bei der maximalen Verzögerung. Dies gilt für beide Manövergruppen, wie in Anhang C, Tabelle 28 zu erkennen ist. In Abbildung 44 rechts ist bei der Gruppe "Bremsen" ein fast linearer Zusammenhang zu erkennen. Bei der Gruppe "Ausweichen" streuen die Werte dagegen im mittleren Bereich sichtbar um eine Gerade. Im Realfahrzeug verzögerten aber einige VPn gar nicht und im VIL wenige über 4 m/s^2 , so dass am oberen und unteren Ende der angenommenen Geraden die Werte zwischen VIL und Realfahrzeug von der gedachten Gerade abweichen.

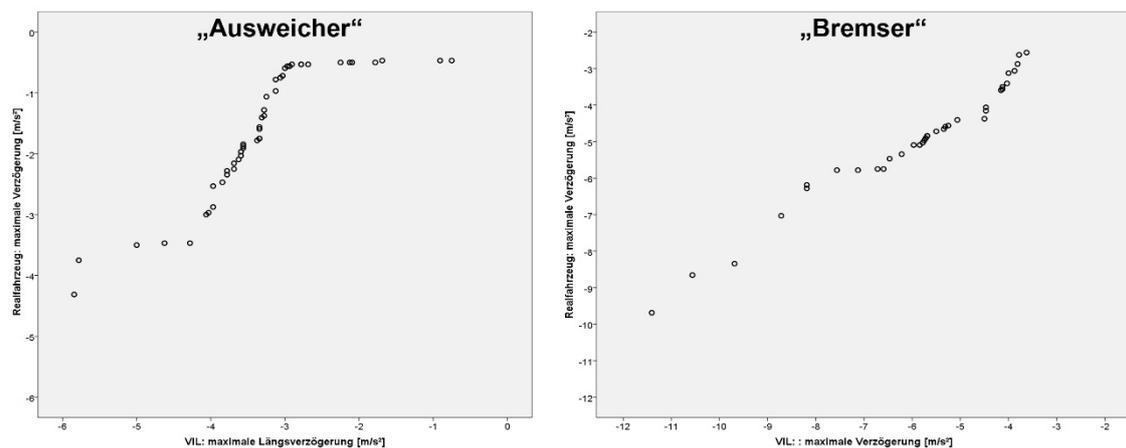


Abbildung 44: Zusammenhang zwischen VIL und Realfahrzeug bei der maximalen Verzögerung, aufgeteilt nach Manöver

Während bei der Gruppe "Bremsen" keine spürbaren Querschleunigungen oder Querversätze aufgezeichnet wurden, spielen diese Größen zur Charakterisierung des Ausweichvorganges eine Rolle. Der Querversatz beschreibt dabei die Differenz von maximaler lateraler Spurposition und der Ausgangsspurposition vor Beginn des Manövers. Wie in Abbildung 45 zu sehen, lag der Querversatz bei allen Bedingungen und beiden Prüfumgebungen auf vergleichbarem Niveau.

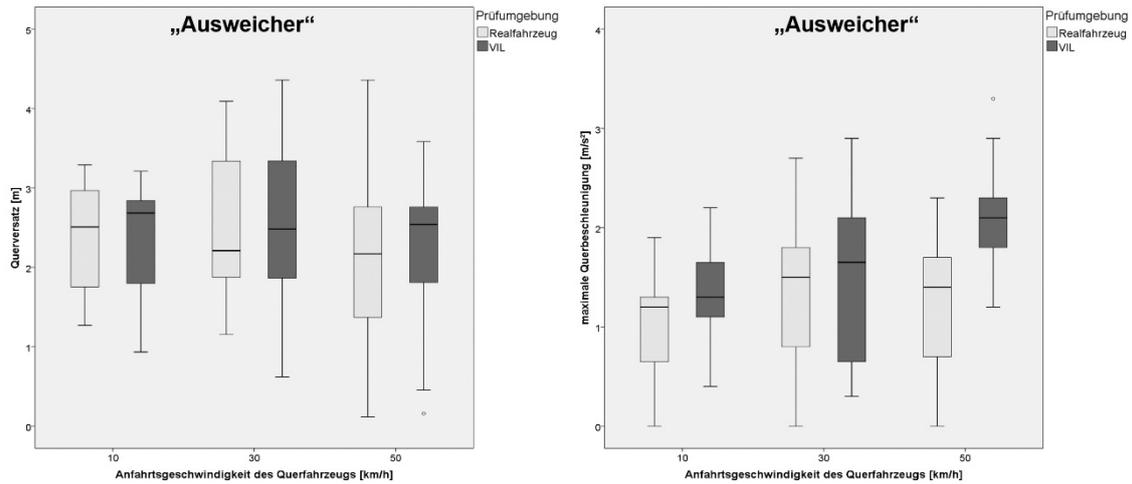


Abbildung 45: QV - Querversatz (links, $n = 100$) und maximale Querbeschleunigung (rechts, $n = 100$) bei "Ausweichen"

Die maximale Querbeschleunigung wurde querab zur Fahrtrichtung gemessen, wobei für die Bestimmung des Maximums Beträge gebildet wurden. Dabei stiegen die Mittelwerte beim VIL mit zunehmender Anfahrtsgeschwindigkeit des TO, wobei die Werte im VIL etwas höher lagen als im Realfahrzeug. Die Lücke zwischen den beiden Systemen wurde auch hier bei der Bedingung 50 km/h am deutlichsten (vgl. Abbildung 45, rechts).

Dennoch korrelieren die Daten zwischen VIL und Realfahrzeug signifikant. Die entsprechenden Korrelationskoeffizienten sind in Anhang C, Tabelle 29 aufgeführt. Wie in Abbildung 46 zu sehen, streuen die Werte entlang von fiktiven Geraden, wodurch ein linearer Zusammenhang naheliegt.

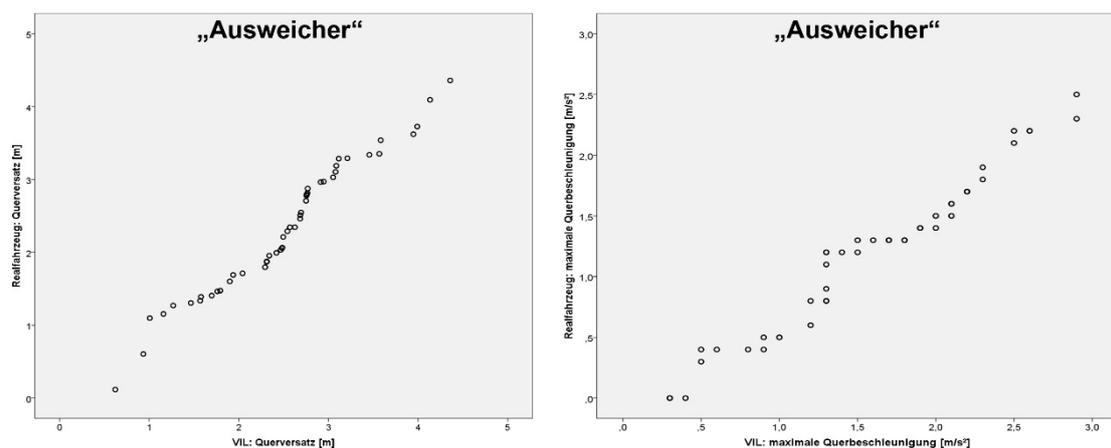


Abbildung 46: Zusammenhang zwischen VIL und Realfahrzeug bei Querversatz (links) und maximaler Querbeschleunigung (rechts) bei "Ausweichen"

4.1.3 Interpretation der Versuchsergebnisse

Ziel der zuvor beschriebenen Studie war es, zum einen die geforderten KON-Parameter für das Vehicle in the Loop zu ermitteln und zum anderen einen Zusammenhang des Fahrerverhaltens in diesen beiden Prüfumgebungen nachzuweisen. Die KON-Parameter unterteilen sich in die Kategorien Wahrnehmung und Fahrerverhalten, die durch verschiedene Szenarien des Längs- und Querverkehrs untersucht wurden.

Wahrnehmung im VIL

Zum Vergleich der Wahrnehmung von Längsabständen wurden zwei Szenarien untersucht, in denen über verschiedene methodische Zugänge der Abstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeug von Probanden bewertet wurde. Es zeigte sich konsistent in beiden Szenarien, dass Abstände im VIL bei gleicher subjektiver Wahrnehmung etwas größer gewählt werden bzw. umgekehrt gleiche objektive Abstände subjektiv etwas kritischer beurteilt werden. Abstände zu Vorderfahrzeugen werden primär über gelernte Abmaße von Fahrzeugen und der Größe von deren Abbild auf der Netzhaut des Fahrers, also indirekt vom Sichtwinkel der Objekte bestimmt (Andersen und Sauer 2007). Um zunächst auszuschließen, dass Unterschiede der Sichtwinkel zwischen VIL und Realfahrzeug Ursache für die gefundenen Abweichungen sind, wurden diese bei verschiedenen Abständen zu einem Vorderfahrzeug statisch gemessen. Diese Messungen, die im Anhang D auf Seite 227 nachzuvollziehen sind, deuten nicht auf merkliche Unterschiede zwischen VIL und Realfahrzeug hin. Diese Ursache soll deshalb zunächst ausgeschlossen werden. Die Gründe müssen deshalb beim Visualisierungssystem im VIL vermutet werden, das dem Fahrer nur ein beschränktes horizontales Sichtfeld von 40° bietet und somit peripheres Sehen limitiert. Weiterhin fehlen dem Fahrer gewohnte optische Referenzen wie das eigene Cockpit mit der dominanten A-Säule. Für die Durchführung von Kontrollierbarkeitsuntersuchungen bedeutet der beobachtete Effekt zum einen, dass Fahrer dazu tendieren werden im VIL mehr Abstand zu Vorderfahrzeugen zu halten. Zum anderen werden Abstände kritischer wahrgenommen als im Realfahrzeug, was dazu führt, dass Fail-Grenzen durch subjektive Urteile im VIL leichter überschritten werden können und binär zu entscheidende Fragen dadurch eher konservativ beantwortet werden.

Die etwas kritischere Einschätzung von Längsabständen im VIL deckt sich auch mit den Beobachtungen bei der Einstufung der TTC anhand der SBFV. Auch dort beurteilen die Fahrer alle untersuchten TTC im VIL als gefährlicher. Der Unterschied zwischen Realfahrzeug und VIL ist hierbei noch etwas stärker ausgeprägt als bei den Szenarien zur

Wahrnehmung von Längsabständen. Der Unterschied zwischen diesen Szenarien und dem Szenario zur Einschätzung der TTC liegt darin, dass der Sichtwinkel des Vorderfahrzeugs bei den Szenarien zur Längswahrnehmung konstant bleibt, beim TTC-Szenario aber kontinuierlich größer wird. Dadurch spielt die Einschätzung der eigenen Geschwindigkeit eine Rolle, die neben der Vergrößerung des Sichtwinkels von statischen Objekten, wie dem Vorderfahrzeug, auch durch den optischen Fluss im peripheren Sichtfeld beeinflusst wird (Beusmans 1998). Die genannten Unterschiede beim Visualisierungssystem führen zu einer nicht korrekten Abbildung des optischen Flusses im peripheren Sichtfeld des VIL-Fahrers. Diese Tatsache und die fehlende Darstellung des eigenen Cockpits könnten sich bei dynamisch veränderlichen Sichtwinkeln verstärkt auswirken und die Ergebnisse erklären. Neben der subjektiven Beurteilung waren die Probanden auch aufgefordert, die TTC zu schätzen. Dabei wurde die Zeit bis zum Aufprall von fast allen Probanden unterschätzt. Während die Ergebnisse bei den höheren TTC zwischen VIL und Realfahrzeug recht ähnlich ausfallen, unterschätzen die Probanden die TTC bei der Bedingung 1.5 s im Realfahrzeug stärker als im VIL. Durch die Beurteilung anhand der SBFV müsste es jedoch genau umgekehrt sein, da kleinere TTC höhere SBFV-Urteile bewirken. Eine mögliche Erklärung für diese Beobachtung liegt in den Unterschieden des Versuchsaufbaus auf der Teststrecke und im VIL. Beim VIL-Fahren benötigt der Fahrer von Anfang an ein hohes Vertrauen in das System und den Versuchsleiter, da er während der Fahrt keine Sicht auf die reale Außenwelt hat. Bei der Einschätzung der TTC wurde dem Fahrer im Teststreckenversuch ebenfalls kurzzeitig die Sicht durch eine Okklusionsbrille genommen. Bei Probedurchläufen drückten fast alle Fahrer den Knopf am Lenkrad instantan nach Aktivierung der Okklusionsbrille, den sie eigentlich erst beim vermuteten Aufprall betätigen sollten. Trotz des versuchten Aufbaus von Vertrauen in den Versuchsleiter und der Funktionalität der Brille in den Übungsdurchläufen kann es deshalb sein, dass vor allem bei der kritischsten TTC von nur 1.5 s die Einschätzungen im Realfahrzeug bedingt durch die subjektiv empfundene Bedrohung und resultierenden schreckhaften Handlungen zu früh erfolgten und somit die TTC weiter unterschätzt wurde als im VIL. Für die Interpretation der KON-Parameter sollte der Vergleich der geschätzten TTC deshalb nicht betrachtet werden. Die aufgrund der Instruktion davon unabhängigen SBFV-Urteile geben aber Aufschluss über die berechtigte Annahme, dass analog zur Beurteilung der Längswahrnehmung in statischen Situationen die TTC im VIL kritischer eingeschätzt wird. Ebenfalls vergleichbar zur dortigen Argumentation, können binäre Fragestellungen im VIL deshalb konservativ in Relation zum Realfahrzeug beantwortet werden.

Eine etwas kritischere Beurteilung im VIL findet sich auch im Bereich der Wahrnehmung von Querabständen. Eine Ausnahme ist bei der engsten Gasse von 2.25 m zu finden, bei der die Urteile im Realfahrzeug kritischer ausfallen. Allerdings muss dieser Umstand relativiert werden, da es speziell bei dieser Gassenbreite möglicherweise Effekte zu berücksichtigen gilt, die für die erhöhten Urteile im Realfahrzeug verantwortlich sein könnten. So wurden bei dieser Gassenbreite fast alle Kollisionen mit Leitbaken im Realfahrzeug verzeichnet. Die Fahrer erhielten bei einem Zusammenstoß direkte Rückmeldung durch ein Knallgeräusch und konnten im Rückspiegel beobachten, wie viele Leitbaken umgefallen bzw. zerstört waren. Im VIL gab es diese Rückmeldung nicht, weshalb gerade bei dieser Bedingung die subjektiven Urteile aufgrund der ungleichen Voraussetzungen etwas verzerrt sein könnten. Bei der Durchfahrt der Leitbaken-Gassen bewegten sich die Fahrer im VIL mit einem Rechtsversatz zur Gassenmitte, der sich mit enger werdenden Gassen noch deutlicher zeigte. Beim Querverkehrs-Szenario war im Einklang mit diesem Resultat der beobachtete Abstand zu einem seitlichen Hindernis auf der rechten Fahrstreifenseite ebenfalls im VIL etwas geringer als im Realfahrzeug. Beim Einschätzen der Spurposition und hier speziell bei engen Gassen, spielt die nicht vorhandene Ansicht des eigenen Fahrzeuges eine gewichtige Rolle für die Wahrnehmung, da der Fahrer die Dimensionen und die relative Position des eigenen Fahrzeuges zu den Leitbaken nur erschwert einschätzen kann. Dadurch, dass Probanden auf dem Fahrersitz nicht mittig im Fahrzeug sitzen, aber keine optischen Anhaltspunkte dafür besitzen, wie groß dieser Versatz ist, neigen sie evtl. dazu die Engstellen aus ihrer Perspektive halbwegs mittig zu durchfahren, was in einem Rechtsversatz resultiert. Für Kontrollierbarkeitsuntersuchungen muss dieser Versatz unbedingt berücksichtigt werden, da mögliche Kollisionen mit Objekten an der rechten Fahrzeugseite in engen Fahrsituationen evtl. aufgrund des Rechtsversatzes zu Stande kommen könnten.

Bei allen untersuchten Szenarien, bei denen eine Einschätzung der Kritikalität anhand der SBFV erhoben wurde, beurteilten die Fahrer die Fahrsituation im VIL kritischer als im Realfahrzeug. Das kann zum einen durch die genannten Unterschiede im Visualisierungssystem und der Wahrnehmung bedingt sein. Eine andere Theorie hängt mit der menschlichen Einschätzung von Risiken zusammen. Laut Slovic et al. (1981) neigen Menschen dazu, Risiken kritischer einzustufen, wenn unbekannte bzw. ungewohnte Faktoren eine Rolle spielen. Beim VIL-Fahren bewegt ein Fahrer ein echtes Fahrzeug über eine Teststrecke, aber mit einer ihm fremden Visualisierungsform. Durch das Bewusstsein, dass er

einerseits ein reales Fahrzeug bewegt, kann risikofreudigeres Verhalten in Fahrsimulatoren wie z.B. in Deery (1999) oder Ranney (2011) ausgeschlossen werden. Im Gegenteil kann sogar angenommen werden, dass Fahrer aufgrund der ungewohnten Umgebung durch das HMD und die virtuelle Welt Fahrsituationen eher kritischer beurteilen. Ähnlich dem Fahren eines nicht vertrauten Fahrzeuges oder dem in einer unbekanntem Stadt könnte dadurch vorsichtigeres Fahrerverhalten erzeugt werden.

Fahrerverhalten im VIL

Die These, dass Probanden im VIL etwas vorsichtiger fahren als auf der Teststrecke, wird durch Ergebnisse beim Geschwindigkeitsverhalten gestützt. Bei der Durchfahrt von Engstellen reduzierten Fahrer im VIL ihre Geschwindigkeit im Vorfeld deutlicher als auf der Teststrecke. Auch bei der Querverkehrssituation bremsten VPn, die sich für ein Umfahren des seitlichen Hindernisses entschieden, stärker als auf der Teststrecke und reduzierten damit auch ihre Geschwindigkeit in größerem Maße. Ein Grund für das vorsichtigeres Verhalten im VIL könnte auf das eingeschränkte Blickfeld zurückzuführen sein. Durch die fehlenden Informationen der peripheren Sicht verhalten sich Fahrer möglicherweise vorsichtiger und verringern die Geschwindigkeit.

Für welches Manöver sich Fahrer beim Erscheinen eines seitlichen Hindernisses am rechten Fahrstreifenrand entscheiden, scheint durch die Prüfumgebung aber weitgehend unbeeinflusst. Zumindest legen dies die beobachteten Verhaltensmuster nahe, bei denen sich sowohl im VIL als auch im Realfahrzeug insgesamt die gleiche Anzahl an Probanden für ein Bremsmanöver bis in den Stillstand bzw. eine Umfahrung des Hindernisses durch ein Ausweichmanöver entschied. Da die beiden Manöverarten sehr unterschiedliche Handlungen des Fahrers voraussetzen, fallen auch die Fahrzeugreaktion und die zu bewertenden Parameter anders aus. Die Wahl eines Manövers blieb hingegen bei fast allen Probanden über alle drei untersuchten Querverkehrssituationen konstant. Beim Erstkontakt stellte sich die Fahrsituation noch etwas überraschender für den Fahrer dar, worauf spätere und heftigere Reaktionen schließen lassen. Dies äußerte sich in größeren maximalen Verzögerungen oder Querschleunigungen und entsprechend höheren Ratings auf der SBFV. Bei der zweiten und dritten Bedingung, die ein Proband beim Querverkehrsszenario erlebte, waren diese Werte in beiden Prüfumgebungen niedriger. Für deren Vergleich spielt das zunächst keine Rolle, da durch den ausbalancierten Versuchsplan Reihenfolgeeffekte ausgeschlossen wurden. Allerdings gibt diese Erkenntnis Hinweise auf die Bedeutung des Erstkontaktes beim Erleben einer überraschenden Fahrsituation, die

auch in Neukum et al. (2014) beschrieben wird. Die Anfahrtsgeschwindigkeit des seitlichen Hindernisses hat beim Querverkehrsszenario einen Einfluss auf die subjektive Bewertung der Situation, die mit zunehmender Geschwindigkeit gefährlicher beurteilt wird. Vor allem bei der Bedingung 50 km/h gehen hier die Urteile zwischen VIL und Teststrecke im Vergleich zu den anderen Bedingungen relativ weit auseinander. Diese Beobachtung könnte durch eine mangelnde Genauigkeit bei der Ausführung der Zielbremsung durch das seitliche Fahrzeug im Realversuch erklärbar sein. Der trainierte Fahrer hatte die Vorgabe, möglichst mit einer Vollbremsung genau einen Meter im Fahrstreifen des Probanden zum Stehen zu kommen. Durch äußere Einflüsse wie Nässe konnte sich der Bremspunkt leicht verschieben, weshalb der Fahrer generell etwas zu früh mit dem Bremsmanöver begann, um die Vorgabe von einem Meter Fahrstreifenüberlappung auf keinen Fall zu überschreiten. Da dadurch die Verzögerung vor allem in der Endphase des Bremsmanövers nicht mehr mit voller Intensität durchgeführt wurde, könnte die Dynamik von den Probanden bei dieser Bedingung anders wahrgenommen worden sein und das Subjektivurteil sich somit verschoben haben. Die objektiven Parameter unterschieden sich zwischen den getesteten Bedingungen nur sehr gering, minimaler Abstand zum Hindernis sowie Querversatz bei der Gruppe "Ausweicher" waren bei allen Anfahrtsgeschwindigkeiten und in beiden Prüfumgebungen nahezu auf demselben Niveau. Ein ähnliches Bild zeichnet sich bei den Reaktionszeiten ab, die zwar im VIL im Mittel ca. 0.2 s länger ausfielen als im Realfahrzeug, aber durch die Anfahrtsgeschwindigkeit des Querverfahrzeuges weitgehend unbeeinflusst blieben. Ein Unterschied ist zwischen den Gruppen "Ausweicher" und "Bremsler" zu finden, wobei die Reaktionszeiten bei letzteren zunächst verkürzt schienen. Das könnte zum einen daran liegen, dass das Kriterium von mehr als 10° Lenkradwinkel, das zur eindeutigen Bestimmung einer Lenkreaktion so gewählt werden musste, einen systematischen Versatz von wenigen Millisekunden bei der Detektion verursacht. Dieser sollte je nach Intensität der Reaktion allerdings kleiner als 0.2 s und deshalb nicht hauptverantwortlich für den gefundenen Unterschied sein. Vielmehr ist zu vermuten, dass manche Fahrer etwas länger abwarten, um die Fahrsituation zu bewerten. Nachdem sie feststellen, dass das Querverfahrzeug zum Stillstand kommt, entscheiden sie sich für eine Umfahrung mit einer Ausweichbewegung, die dann erst etwas später einsetzt. Für diese Vermutung spricht auch die größere Streuung bei den Reaktionszeiten in der Gruppe "Ausweicher". Diese kommt wahrscheinlich dadurch zu Stande, dass ein Teil der "Ausweicher" zunächst kurz die Bremse betätigten (vgl. Abbildung 43, links), diese aber wieder los ließen, sobald sie bemerkten, dass das querende Fahrzeug steht und dann

um das Hindernis herum lenkten. Da die Betätigung der Bremse aber in diesem Fall zur Bestimmung der Reaktionszeit entscheidend, weil zeitlich früher war, trugen diese kürzeren Reaktionszeiten zur größeren Streuung als bei der Vergleichsgruppe "Bremsler", bei. Die maximale Intensität der Fahrerreaktion nahm jedoch sowohl in Längsrichtung (maximale Verzögerung) als auch in Querrichtung (maximale Querb beschleunigung) mit der Anfahrtsgeschwindigkeit des Querfahrzeugs zu. Der Fahrer schien damit seine erste Reaktion auf die Dynamik des anfahrens Querfahrzeugs zu adaptieren. Da die Parametrierung des Szenarios aber genügend zeitlichen Spielraum zur Lösung des Konflikts ließ, regelten die Fahrer entsprechend das von ihnen gewählte Manöver ohne weitere Beeinflussung durch andere Störgrößen zu Ende, was sich dann zwischen den Bedingungen final kaum unterschied. Auch hier war jedoch zwischen VIL und Teststrecke bei der Bedingung 50 km/h ein Unterschied zu beobachten, wobei die Reaktionen im VIL intensiver ausfielen. Der Grund könnte, wie beschrieben, in den Beschränkungen des Realversuchs liegen oder mit der zuvor erwähnten These des vorsichtigeren Verhaltens in der ungewohnten VIL-Umgebung zusammenhängen. In den anderen Bedingungen war dieser Unterschied nicht zu finden.

Für Kontrollierbarkeitsfragen bildet das VIL das dynamische Fahrerverhalten bei Querverkehrssituationen bis auf wenige, vermutlich Versuchsbedingte Ausnahmen, ohne deutliche Unterschiede zum Realfahrzeug ab. Die leicht verspäteten Reaktionen der Fahrer müssen für zeitlich enger parametrisierte Szenarien berücksichtigt werden, die Manöverwahl und das daraus resultierende Regelverhalten der Fahrer scheint im VIL für Querverkehrssituationen nicht unterschiedlich zu sein.

Im Bereich der Längsdynamik zeigte sich dagegen ein deutlich anderes Bild. Speziell die Reaktionszeiten waren dort im VIL teilweise sehr viel länger als im Realfahrzeug. Dies war sowohl bei beschleunigenden als auch verzögernden Vorderfahrzeugen zu beobachten. Mit steigender Brems-Intensität des vorausfahrenden Fahrzeuges näherten sich die Reaktionszeiten zwischen VIL und Realfahrzeug bis auf einen mittleren Unterschied von ca. 0.3 s an, bei geringen Intensitäten klafften sie jedoch im Mittel über eine Sekunde auseinander. Da die Unterschiede zwischen VIL und Realfahrzeug bei hohen Brems-Intensitäten im Bereich der gefundenen Differenzen der Reaktionszeiten bei Querverkehr liegen, kann hier vermutlich von einem relativ konstanten simulationsbedingten Versatz ausgegangen werden. Dieser umfasst zum einen eine technisch bedingte Systemlatenz, die etwa im Bereich von 0.1 s anzusiedeln ist (Berg 2014, S. 89), zum anderen scheint

der Wahrnehmungs-/Entscheidungsprozess des Fahrers durch die Besonderheiten der Visualisierung und der virtuellen Welt leicht verlangsamt. Die größeren Reaktionszeit-Unterschiede, die bei geringen Beschleunigungswerten des Vorderfahrzeuges gefunden wurden, könnten durch die beschriebene Schwierigkeit bei der Wahrnehmung von veränderlichen Sichtwinkeln im VIL erklärbar sein. Darauf deutet vor allem auch die Verzögerungsbedingung von -1 m/s^2 hin, bei der am Vorderfahrzeug keine Bremslichter als weitere optische Hilfe aufleuchteten. Bedingt durch verlängerte Reaktionszeiten mussten die Fahrer dann im VIL auch entsprechend härter bremsen um eine Kollision mit dem verzögernden TO zu vermeiden. Bei Beschleunigungen des Vorderfahrzeuges hingegen ergab sich diese Notwendigkeit nicht zwingend, so dass vergleichbare Intensitäten beim Beschleunigungsvorgang der Fahrer verzeichnet wurden. Für Kontrollierbarkeitsfragen, bei denen meist hochdynamische Manöver getestet werden, ist das Problem der stark verzögerten Reaktionen auf wenig dynamische Objekte im Längsverkehr obsolet. Die dennoch signifikant längeren Reaktionszeiten bei hohen Verzögerungen oder Beschleunigungen von Fahrzeugen im Längsverkehr müssen unbedingt für Versuche im VIL korrigiert werden, da diese eine Fahrsituation zusätzlich verschärfen und heftigere Fahrerreaktionen oder gar Kollisionen bedingen können. Ohne eine Korrektur der Werte sollte das VIL wegen der deutlichen Abweichungen nicht für Kontrollierbarkeitsfragen bei längsdynamischen Manövern eingesetzt werden. Eine Möglichkeit wird in Kapitel 4.2 durch Transferfunktionen aufgezeigt. Trotz allem fallen subjektive Urteile wie auch objektive Fahrerreaktionen so aus, dass Situationen eher zu kritisch beurteilt werden, was konservative Pass-/Fail-Urteile bei Kontrollierbarkeitsfragen hervorrufen würde.

Zusammenhang von Ergebnissen aus VIL und Realfahrzeug

Zur Ermittlung der KON-Parameter galt ein Zusammenhang der Daten aus VIL und Realfahrzeug als Bedingung. Um diesen nachzuweisen, wurden Ergebnisse aus beiden Prüfungsumgebungen gegeneinander geplottet und Korrelationskoeffizienten berechnet. Es zeigt sich für alle betrachteten Variablen ein signifikanter Zusammenhang, von dem aufgrund der Plots bis auf wenige Ausreißer eine Linearität angenommen werden kann. Der geforderte Nachweis relativer Validität im Fahrerverhalten wurde damit erbracht. Zudem sind Abweichungen zwischen VIL und Realfahrzeug in Richtung und Betrag aus den KON-Parametern bekannt. Das VIL kann somit für die Bewertung von Kontrollierbarkeitsfragen eingesetzt werden.

Auf dieser Basis ist es auch möglich, unter bestimmten Randbedingungen die Abweichungen von Ergebnissen aus dem VIL im Nachhinein zu korrigieren und gewissermaßen auf die Gegebenheiten des Realfahrzeuges zu transferieren. Ein mögliches Verfahren wird im nächsten Unterkapitel vorgestellt.

4.2 Transfer von Untersuchungsergebnissen

Bei der Ermittlung der KON-Parameter für das VIL wurde deutlich, dass Fahrer bei bestimmten Fahrsituationen im Realfahrzeug und VIL gleiche Verhaltensmuster zeigten. Aufgrund der diskutierten Besonderheiten der Simulationsumgebung traten bei einigen Parametern trotzdem signifikante Unterschiede zum Realfahrzeug auf. Dies würde das VIL in diesen Manövern für die hohen Ansprüche einer Kontrollierbarkeitsprüfung disqualifizieren. Eine Möglichkeit, die hier einen Ausweg bietet, stellt eine Korrektur von Messwerten über sogenannte Transferfunktionen dar. Ein solches Verfahren, das unter bestimmten Voraussetzungen Anwendung finden kann, wird im weiteren Verlauf hergeleitet.

Während über Unterschiede zwischen Simulatoren und Realfahrzeugen zahlreiche Literaturbefunde vorliegen (z.B. Blana 1996b; Kemeny und Panerai 2003; Mullen et al. 2011), sind zur Übertragbarkeit von Daten zwischen diesen Prüfumgebungen kaum Ergebnisse publiziert. Unter solch einem Transfer wird verstanden, dass im Simulator gewonnene Daten korrigiert oder umgerechnet werden, so dass sie Fahrerverhalten im Realfahrzeug widerspiegeln. Ein Verfahren, in dem über Regressionsmodelle die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines subjektiven Ratings in einer Prüfumgebung bestimmt wird, ist in Purucker et al. (2014) veröffentlicht. Die Publikation basiert auf den ab Seite 49 beschriebenen Szenarien zur Ermittlung der KON-Parameter im Bereich der Längswahrnehmung, die dort neben dem Realfahrzeug und dem VIL auch in einem dynamischen Fahrsimulator von Probanden durchfahren wurden. Die dabei gemessenen Abstände zum Vorderfahrzeug werden mit der entsprechenden subjektiven Bewertung in ein ordinales logistisches Regressionsmodell gefüttert, mit dem dann die Wahrscheinlichkeit für ein Rating bei einer bestimmten THW zum Vorderfahrzeug bestimmt wird. In Abbildung 47 können diese Wahrscheinlichkeiten entnommen werden.

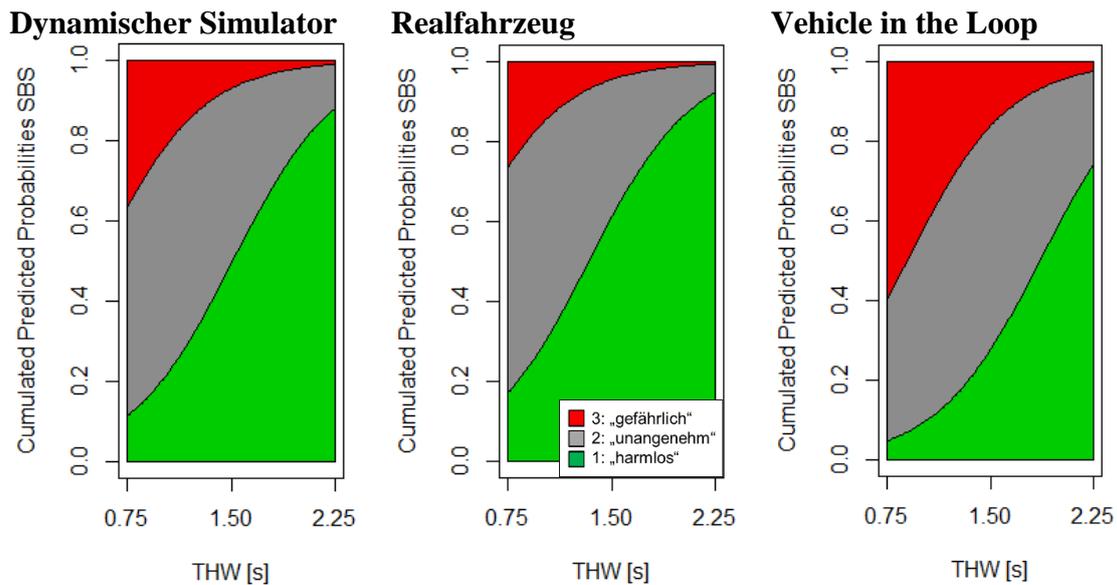


Abbildung 47: Wahrscheinlichkeiten für SBFV-Urteile in verschiedenen Prüfumgebungen (Purucker et al. 2014)

Dort ist auf der Hochachse die kumulierte prädierte Wahrscheinlichkeit aufgetragen, die THW entlang der Querachse. Die Wahrscheinlichkeiten für SBFV-Urteile für eine bestimmte THW werden senkrecht über dieser THW abgelesen. So betragen bei einer THW von 0,75 s im Realfahrzeug die Wahrscheinlichkeiten für ein "harmlos"-Urteil knapp 20%, für ein "unangenehm"-Urteil ca. 60% und für ein "gefährlich"-Urteil etwas mehr als 20%. Es ist zu erkennen, dass im VIL und im dynamischen Fahr Simulator ein "gefährlich"-Urteil, welches durch den roten Bereich gekennzeichnet ist, bei denselben THW wahrscheinlicher ist als im Realfahrzeug. Bei einer THW von 1,5 s liegt z.B. die Wahrscheinlichkeit für ein "harmlos"-Urteil bei ca. 60% im Realfahrzeug, im VIL nur etwa bei 30%. Der Ansatz von Purucker et al. (2014) ermöglicht eine Einschätzung der Vergleichbarkeit von Subjektiv-Urteilen zwischen den Prüfumgebungen über eine Wahrscheinlichkeitsmodellierung. In einem weiteren Schritt sollen auf Basis der KON-Parameter und der damit quantifizierten Unterschiede nicht nur Wahrscheinlichkeiten für Ergebnisse betrachtet, sondern Versuchsdaten aus Simulationsumgebungen im Nachhinein korrigiert werden.

4.2.1 Vorüberlegungen für Transferfunktionen

Da sich Simulator-Setups häufig ändern und die KON-Parameter sich damit verschieben können, soll hier ein Ansatz vorgestellt werden, der ausschließlich auf den ermittelten

KON-Parametern für das Realfahrzeug auf der Teststrecke basiert. Dafür soll in Anlehnung an die Beschreibung der Fahrerleistungen nach Abendroth und Bruder (2015) das Fahrerverhalten im Realfahrzeug anhand der ermittelten Kennwerte für bestimmte Fahr-situationen beispielhaft modelliert und Simulationsdaten damit korrigiert werden.

Ausgehend von einem äußeren Reiz, auch Stimulus genannt (vgl. Abbildung 48), z.B. den optischen Hinweisen auf ein verzögerndes Vorderfahrzeug, benötigt der Fahrer eine gewisse Zeitspanne, um diesen Reiz wahrzunehmen (Perzeption) und eine Entscheidung über eine mögliche Handlung zu treffen (Kognition). Die Zeitspanne bis zur Umsetzung der Handlung wird dabei als Reaktionszeit bezeichnet (Abendroth und Bruder 2015). Über die kontinuierlich fortlaufende Perzeption und Rückmeldungen vom Fahrzeug können Entscheidungen und Handlungen korrigiert, oder Größen wie Geschwindigkeit und Spurposition, die am Ende der Kette als Ist-Größen des Fahrzeuges stehen, entsprechend geregelt werden (Abendroth und Bruder 2015).

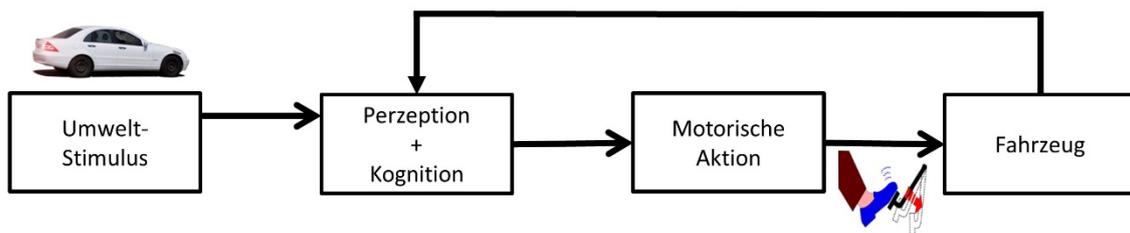


Abbildung 48: Vereinfachte Darstellung des Fahrer-Informationsverarbeitungsprozesses
 Wie in Kapitel 4.1.2 gezeigt, kann die Beschaffenheit der äußeren Stimuli alle Teile der Regelkette beeinflussen. Die Anfahrtsgeschwindigkeit eines noch relativ weit entfernten, querenden Fahrzeuges hat z.B. wenig Einfluss auf die Reaktionszeit und die weiteren motorischen Handlungen der Fahrer. Die gefundenen Unterschiede zwischen VIL und Realfahrzeug belaufen sich bei diesem Szenario ebenfalls auf konstante Abweichungen, die sich zwischen den verschiedenen äußeren Reizen nicht wesentlich unterscheiden.

In Abbildung 49 sind beispielhaft Trajektorien abgebildet, die aus allen "Ausweichern" der Bedingung 50 km/h gemittelt wurden, mit dazugehöriger Standardabweichung als hinterlegte halbtransparente Fläche. Die mittlere Trajektorie für das VIL ist in blau und für das Realfahrzeug in grün gehalten, wobei messtechnisch jeweils die Trajektorie der Fahrzeugmitte geplottet ist. Die Hochachse wurde dabei als Abweichung von der Fahrstreifenmitte in Metern und die Querachse als zeitlicher Verlauf in Sekunden aufgetragen. Die Dimensionen der Grafik entsprechen der Breite von zwei Fahrstreifen mit je 3.5 m

Breite, wobei beide durch eine gestrichelte Linie getrennt werden. Das angedeutete Querfahrzeug erreicht bei ca. 6 s seine Halteposition und ragt wie angedeutet einen Meter in den Fahrstreifen. Es ist zu erkennen, dass die grüne Realfahrzeug-Trajektorie minimal früher aus dem geraden Verlauf in die Ausweichbewegung übergeht als die blaue Kurve des VIL. Im Resultat unterscheiden sich aber beide Kurven kaum, abgesehen davon, dass die Fahrer im Realfahrzeug nach dem Ende der Ausweichsituation etwas später in den eigenen Fahrstreifen zurück wechseln. Eine Transferfunktion ist in diesem Fall nicht erforderlich, da die zeitlich wenig kritische Parametrierung des Szenarios dafür sorgt, dass die Fahrer im VIL die leicht spätere Reaktion entsprechend selbst ausregeln und somit die entscheidenden Resultate wie Querversatz oder minimaler Abstand zum Hindernis gleich bleiben.

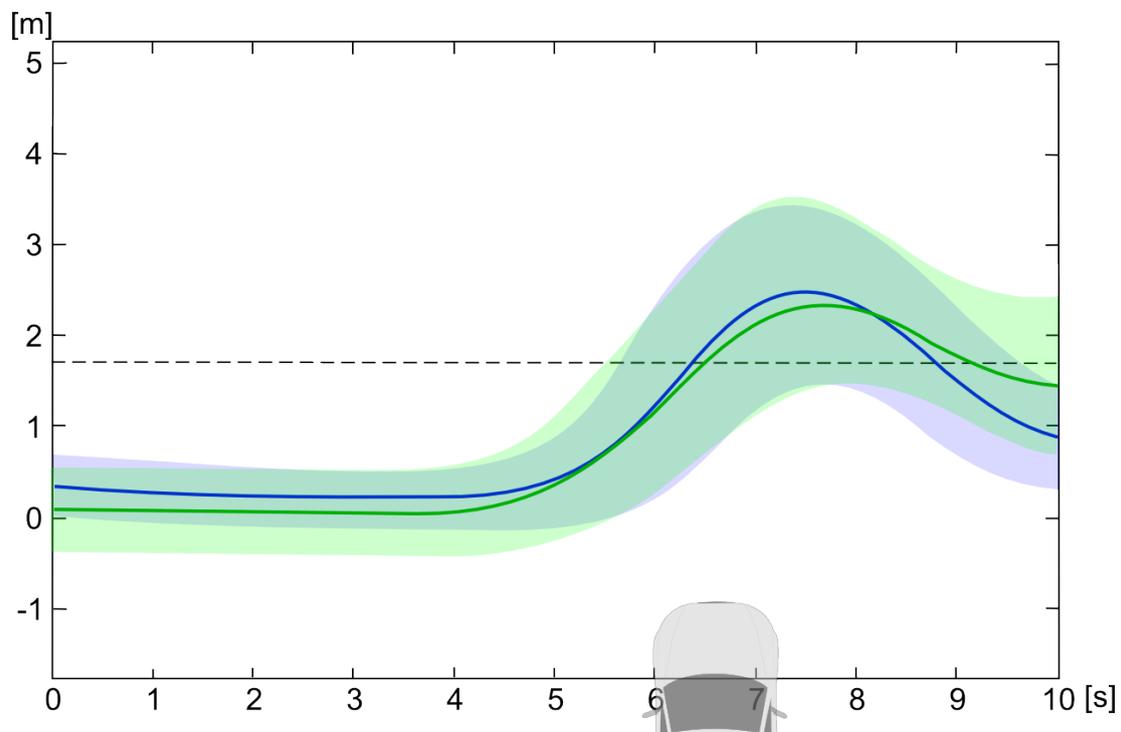


Abbildung 49: Mittlere Ausweichtrajektorie im Realfahrzeug (grün) und VIL (blau) mit Standardabweichung bei der Bedingung 50 km/h

Ein Fall, bei dem eine Transferfunktion erforderlich ist, ist das Szenario eines verzögerten Vorderfahrzeuges. Dort wirkt sich die Intensität der Verzögerung, also die Beschaffenheit des äußeren Reizes, auf die Reaktionszeiten der Fahrer und diese wiederum auf die Handlung aus. Je nachdem, wie stark das Vorderfahrzeug verzögert, weichen auch die Ergebnisse zwischen VIL und Realfahrzeug unterschiedlich stark voneinander ab.

In Abbildung 50 sind zur Veranschaulichung Geschwindigkeitsverläufe aller Fahrer in VIL (blau) und Realfahrzeug (grün) gemittelt mit zugehöriger Standardabweichung als halbtransparente Fläche dargestellt. Die Geschwindigkeit des Vorderfahrzeuges ist schwarz gezeichnet und stellt eine Verzögerung mit 3 m/s^2 dar. Es ist deutlich zu erkennen, dass die grüne Kurve des Realfahrzeugs unmittelbar nach dem Geschwindigkeitsabfall des Vorderfahrzeuges mit ähnlichem Gradient sinkt. Die blaue Kurve des VIL hingegen beginnt erst wesentlich später mit dem Geschwindigkeitsabfall, weshalb mit einem höheren Gradienten die Geschwindigkeit abgebaut werden muss, um eine Kollision zu vermeiden. Auch das Einpendeln der Geschwindigkeit am Ende des Manövers ist im VIL deutlich unrunder als im Realfahrzeug, was die hohe Standardabweichung in diesem Bereich vermuten lässt.

Dieser nicht-lineare Zusammenhang, bei dem zusätzlich noch Abhängigkeiten zwischen beinahe allen Faktoren des in Abbildung 48 beschriebenen Regelkreises gegeben sind, erfordert eine komplexe Transferfunktion.

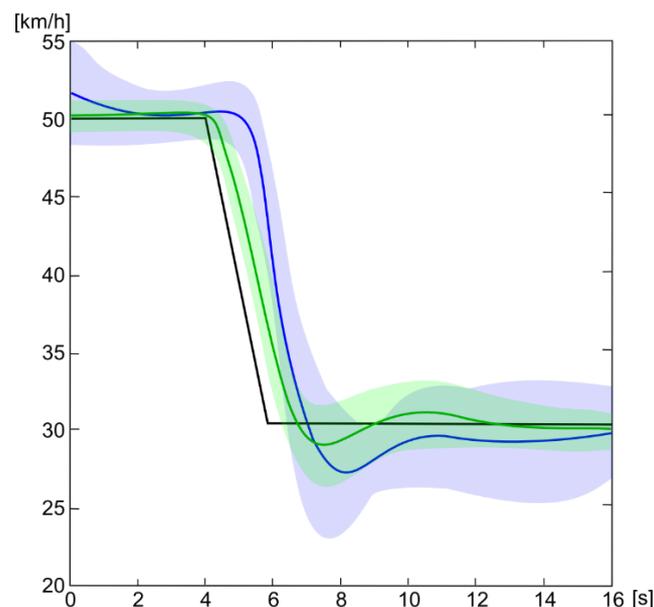


Abbildung 50: Mittlere Geschwindigkeitsverläufe mit Standardabweichung in VIL (blau) und Realfahrzeug (grün) bei einer Verzögerung des TO von 3 m/s^2 (schwarz)

Am Beispiel der Folgefahrt mit Verzögerung soll hier eine Möglichkeit aufgezeigt werden, wie ein solcher Transfer zu lösen ist. Für das vorgestellte Verfahren wird die Stichprobe der Realfahrzeugdaten mit verzögerndem Vorderfahrzeug herangezogen und gesplittet. Aufgrund des Versuchsplans kann wegen Reihenfolgeeffekten nicht beliebig geteilt werden. Probanden mit gleicher Versuchsreihenfolge werden deshalb zufällig in

zwei Gruppen gleicher Größe aufgeteilt. Eine Gruppe dient zur Entwicklung des Algorithmus, die zweite soll im Anschluss zur Verifizierung und zum Abgleich herangezogen werden.

Zunächst wird für einen Transfer von Ergebnissen die Modellierung des Einflusses der Umwelt-Stimuli auf die Reaktionszeit benötigt. Dazu sind die im Versuch ermittelten Reaktionszeiten gegen die Beträge der dabei anliegenden Verzögerungen des TO aufgetragen (vgl. Abbildung 51).

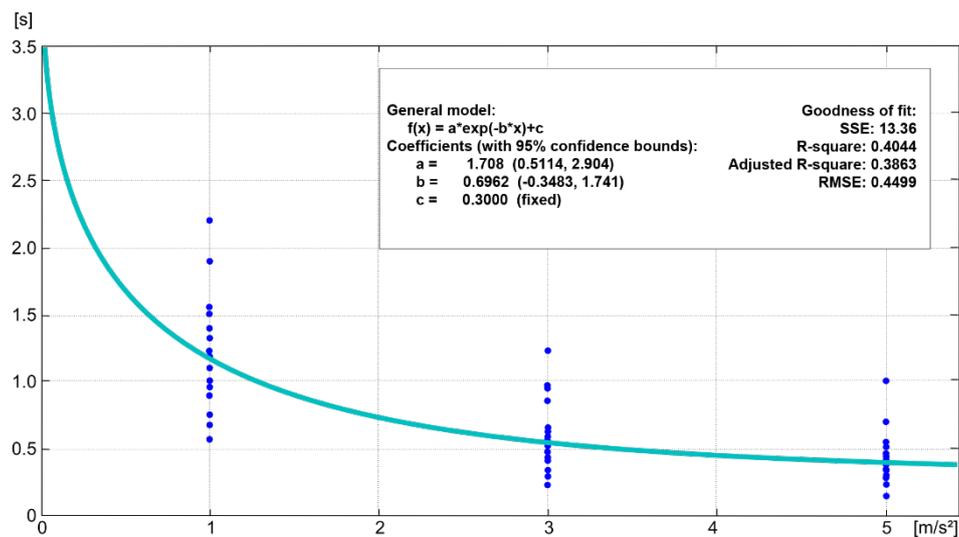


Abbildung 51: Reaktionszeiten in Abhängigkeit des äußeren Reizes (Betrag der Verzögerung des TO)

In Anbetracht des menschlichen Informationsverarbeitungsprozesses existiert ein Minimum an Reaktionszeit, die ein Fahrer benötigt bis er nach einem wahrgenommenen Reiz das Bremspedal betätigt. Gemäß Abendroth und Bruder (2015) liegen mittlere Reaktionszeiten von aufmerksamen Fahrern, die mit einem Bremsmanöver rechnen, bei ca. 0.7 s. Bei Fitch et al. (2010) benötigten Fahrer durchschnittlich 0.78 s um auf ein erwartetes Hindernis zu reagieren, wobei die minimale Reaktionszeit bis zur Betätigung der Bremse eines Fahrers in diesem Versuch bei 0.3 s lag. Dieser letzte Wert soll für eine Modellierung von Fahrerreaktionszeiten als Grenzwert angenommen werden, unter den eine Fahrerreaktionszeit normalerweise nicht fallen kann. Bei entsprechend schwächeren Reizintensitäten wird eine Fahrerreaktion extrem lange dauern oder ganz ausbleiben, weshalb Reaktionszeiten nicht linear sondern als exponentiell wachsend angenommen werden. Für die vorliegenden Werte in Abbildung 51 wird deshalb über die Curve-Fitting-Toolbox von Matlab eine Exponentialfunktion mit dem unteren Grenzwert 0.3 s ermittelt, die über die Methode der kleinsten Quadrate einen bestmöglichen Fit-Wert erzielt. Diese

Funktion, die den Zusammenhang zwischen dem Stimulus eines verzögernden Vorderfahrzeuges und der Reaktionszeit des Fahrers wiedergeben soll, ist als Funktion und Gleichung mit entsprechenden "Goodness of Fit"-Werten in Abbildung 51 zu sehen.

In Abbildung 50 wird aufgezeigt, dass die Geschwindigkeit bei einem Bremsmanöver wegen eines konstant verzögernden Vorderfahrzeuges nach kurzer Adaptionszeit fast linear abfällt. In einem weiteren Schritt werden nun die in diesem Bereich gemessenen durchschnittlichen Verzögerungswerte der Realfahrzeug-Stichprobe gegen die entsprechenden Reaktionszeiten aufgetragen (vgl. Abbildung 52). Es ist anzunehmen, dass ein Fahrer, der eine längere Zeitspanne bis zu einer Reaktion braucht, entsprechend stärker bremsen muss, um eine Kollision zu vermeiden. Dieser Zusammenhang soll zunächst als linear angenommen werden. Im selben Verfahren wie zuvor wird eine Gerade ermittelt, die diesen Zusammenhang bestmöglich widerspiegeln soll (siehe Abbildung 52).

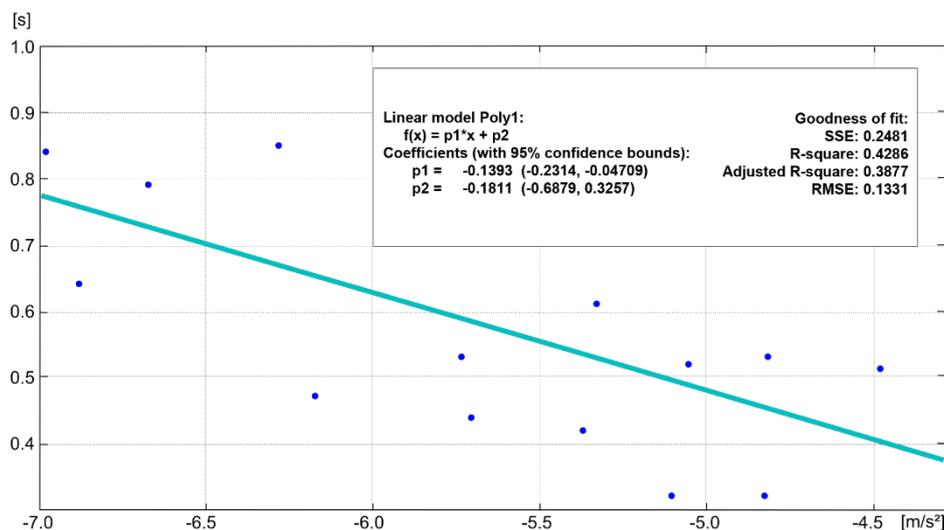


Abbildung 52: Durchschnittliche Verzögerung mit zugehöriger Reaktionszeit der Fahrer bei einer Verzögerung des TO von 3 m/s²

4.2.2 Transfer von Versuchsdaten

Anhand der vorgestellten Zusammenhänge können nun mittlere Geschwindigkeitsverläufe von Personengruppen aus einer Simulationsumgebung korrigiert werden. Um dies rechnergestützt ermöglichen zu können, muss ein solcher Geschwindigkeitsverlauf zunächst mathematisch beschrieben werden. Das könnte durch ein Polynom n-ten Grades

erfolgen, wobei sich mit steigendem Grad zwar die Kurve dem realen Verlauf normalerweise immer weiter nähert, aber die einzelnen Parameter physikalisch nicht mehr zu deuten sind. Deshalb wird der Geschwindigkeitsverlauf in mehrere sinnvolle Abschnitte zerlegt (vgl. Abbildung 53, oben links). Der erste Teil beschreibt einen konstanten Geschwindigkeitsverlauf während der Folgefahrt. Im zweiten, magenta-farbenen Bereich fällt die Geschwindigkeit quadratisch ab, während sie im anschließenden Verlauf (cyan) konstant sinkt. Im letzten Abschnitt pendelt der Fahrer seine Geschwindigkeit wieder hinter dem Vorderfahrzeug ein, was beim Geschwindigkeitsverlauf mathematisch durch eine gedämpfte Schwingungsfunktion angenähert werden kann. Die Näherungsfunktionen werden ebenfalls wieder über ein best-fit-Verfahren mit dem Curve-Fitting-Tool von Matlab bestimmt.

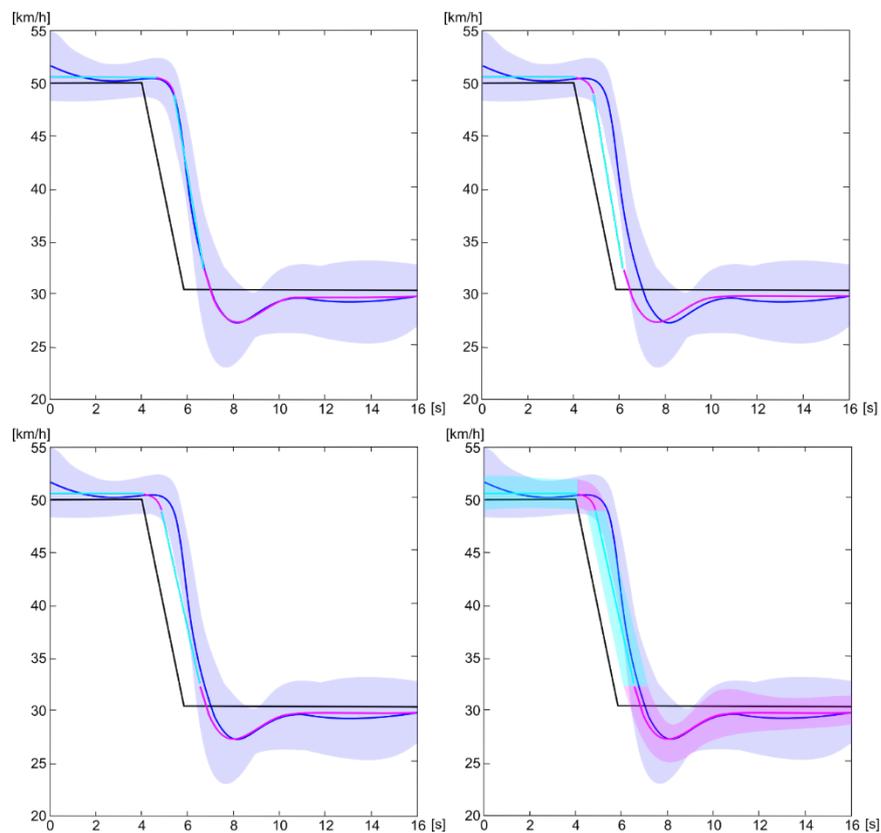


Abbildung 53: Schrittweise Korrektur der Geschwindigkeitsverläufe

Im nächsten Schritt (Abbildung 53, oben rechts) werden diese Näherungsfunktionen um die ermittelte Differenz anhand der Reaktionszeitentabelle in Abbildung 51 korrigiert. Der lineare Abfall der Geschwindigkeit muss dann ebenfalls anhand der in Abbildung 52 vorgestellten Zusammenhänge korrigiert werden (Abbildung 53, unten links), während im letzten Schritt die Standardabweichungen angepasst werden (Abbildung 53, unten

rechts). In Abbildung 54 ist auf der linken Seite der Geschwindigkeitsverlauf vor der Transformation (blau) gegen die Vergleichsgruppe, die nicht zur Algorithmus-Entwicklung herangezogen wurde (grün), aufgetragen. Als Resultat der Transformation ist auf der rechten Seite die korrigierte Funktion ebenfalls gegen die Vergleichsgruppe (grün) aufgetragen. Durch die nachträgliche Korrektur der Daten konnte eine deutliche Annäherung an die Ergebnisse der Realfahrzeugstichprobe erreicht werden.

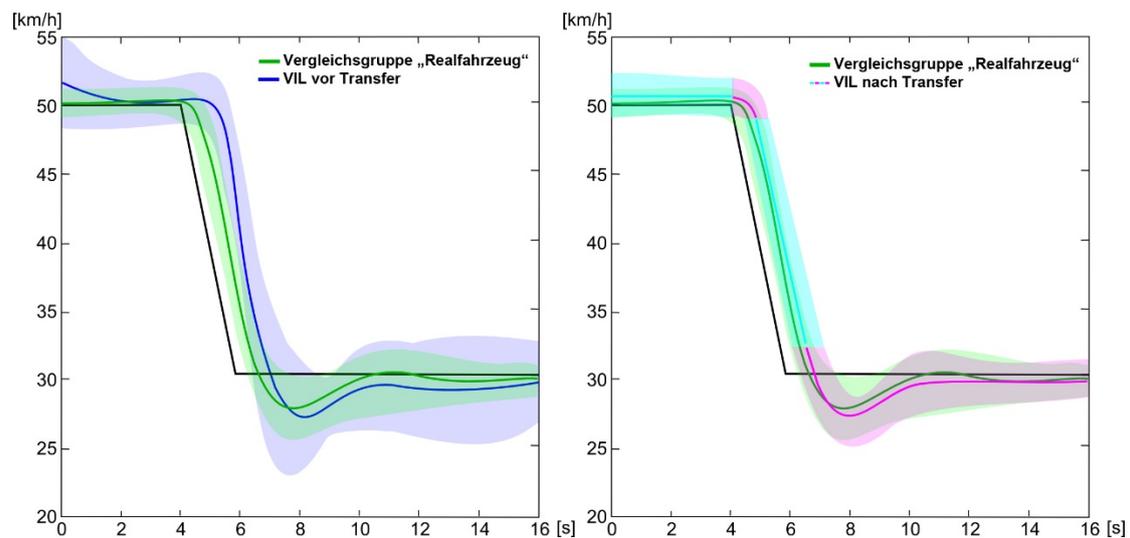


Abbildung 54: Geschwindigkeitsverläufe vor (links) und nach Transformation (rechts) mit Vergleichsgruppe

4.2.3 Kritik am Verfahren und Ausblick

Am Beispiel der Korrektur von Geschwindigkeitsverläufen aus einer Simulationsumgebung wurde ein Verfahren zum Transfer von Versuchsdaten vorgestellt. Die Vorgehensweise basiert dabei auf ermittelten Kennwerten für Fahrerleistungen aus dem Realfahrzeug. Die dafür herangezogene Stichprobe zur Ermittlung von Zusammenhängen beim Informationsverarbeitungsprozess des Fahrers ist durch die nötige Teilung zur Generierung einer Kontrollgruppe mit $n=15$ verhältnismäßig klein. Die gefundenen Zusammenhänge und die angenommene Linearität bzw. das exponentielle Wachstum von Reaktionszeiten sollte mit größeren Stichproben verifiziert werden.

In der hier vorgestellten Version wurden zunächst gemittelte Geschwindigkeitsverläufe korrigiert, die den Durchschnittsfahrer widerspiegeln sollen und durch Einbezug der Standardabweichung Rückschlüsse auf das Kollektiv zulassen. Der Ansatz, die Korrektur lediglich über Kennwerte aus dem Realfahrzeug zu bewältigen, hat zwar den Vorteil, dass das Verfahren für fast jeden Fahrsimulator anwendbar und gleichzeitig robust gegenüber

Veränderungen in Simulator-Setups ist. Es hat aber den Nachteil, dass nur die Messwerte eines Kollektivs korrigiert werden können. Die Daten einer einzelnen Versuchsperson können dabei zunächst nicht betrachtet werden, da die Fahrerleistungskennwerte Mittelwerte eines Fahrerkollektivs im Realfahrzeug repräsentieren. Die Möglichkeit der Korrektur von Messdatensätzen einzelner VPn wäre potentiell in das Verfahren zu integrieren, indem der Versatz zwischen Simulationsumgebung und Realfahrzeug für jeden Kennwert bestimmt werden müsste. Dieser Versatz könnte dann bei jeder einzelnen VP behoben werden. Das würde allerdings bedeuten, dass mit jeder Veränderung an der Simulationsumgebung die nötigen Kennwerte über die KON-Parameter neu bestimmt werden müssten. Weiterhin ist der Transfer von Daten nur möglich, wenn Referenzdaten aus dem Realfahrzeug in ausreichender Quantität und Qualität für die untersuchten Stimuli vorhanden sind. Diese sind speziell für kritische Fahrsituationen auf der Teststrecke nicht ohne Risiko zu erzeugen.

Mit dem vorgestellten Verfahren muss zudem ein vergleichsweise hoher Aufwand betrieben werden, um für eine spezielle Fahrsituation (z.B. Fahrerreaktion auf Verzögerung eines Vorderfahrzeuges) Fahrerleistungen aus dem Realfahrzeug zu ermitteln, die zum Transfer notwendig sind. Das Argument, Simulatoren wegen des geringeren Aufwandes und der Sicherheit einzusetzen, würde damit ad Absurdum geführt. Eine Möglichkeit diesen Aufwand nicht für jeden Versuch aufs Neue betreiben zu müssen wäre die Erzeugung einer Fahrerleistungsdatenbank, in der die essentiellen Kennwerte wie Reaktionszeiten auf bestimmte Stimuli und darauf folgende Handlungen mit zugehöriger Intensität gespeichert werden.

So lange ein solcher Datenpool aber nicht verfügbar ist, erweist es sich als praktikabler bei der Erstellung von Testfällen in Simulationsumgebungen die in den KON-Parametern gefundenen Unterschiede bereits bei der Parametrierung von Fahrsituationen zu berücksichtigen. Das heißt, wenn Fahrer bei querenden Hindernissen im VIL beispielsweise 0.3 s später reagieren als im Realfahrzeug, sollte das Hindernis um diese Zeit früher erscheinen, was wiederum einen aufwendigen Transfer der Ergebnisse im Nachhinein ersparen würde.

5 Controllability-Assessment mit der VIL-Methode

Zur Entwicklung einer neuen Kontrollierbarkeitsmethodik auf Basis des VIL war es zwingende Voraussetzung, dass zunächst die Eignung der Prüfumgebung selbst nachgewiesen wird. Ein Zusammenhang des Fahrerverhaltens zwischen VIL und Realfahrzeug wurde in Kapitel 4.1. erbracht. Parameter, bei denen Unterschiede beobachtet wurden, können über die in Kapitel 4.2 vorgestellten Transferfunktionen korrigiert werden. Gemäß der in Abbildung 19 aufgeführten Schritte zur Eignungsfeststellung und in Ergänzung mit den in Kapitel 3 aufgeführten Aspekten bietet das VIL somit die Basis zur Etablierung einer neuen Methodik im Controllability-Assessment von Notfall-FAS. Im Folgenden soll diese Methodik für die Absicherung von KAB-Systemen im frühen Entwicklungsstadium aufgezeigt werden. Zunächst werden dafür mögliche Risiken und Gefährdungen durch KAB-Systeme abgeleitet und daraus relevante Testfälle identifiziert. Diese sollen dann empirisch untersucht werden und eine Bewertung der Kontrollierbarkeit erfolgen. Gleichzeitig ist dabei immer eine Evaluierung der Methodik notwendig, um die VIL-Methode für finale Kontrollierbarkeitsuntersuchungen vor Markteinführung zu verifizieren und zu etablieren.

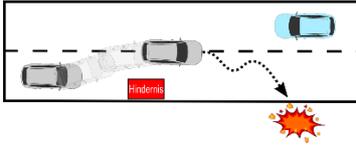
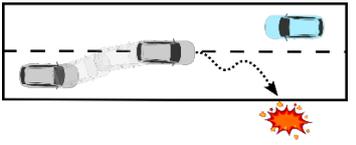
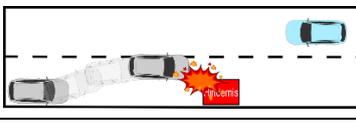
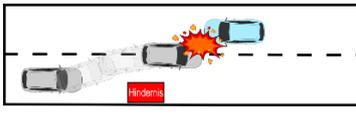
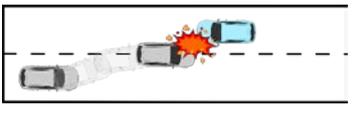
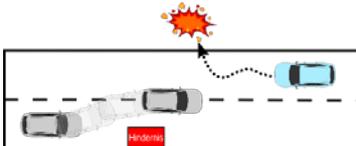
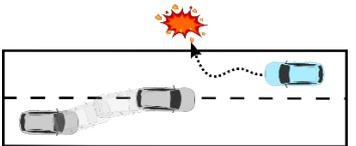
5.1 Kontrollierbarkeitsfragen bei Ausweichassistenzsystemen

In der ISO 26262-3 (2011) werden ausschließlich mögliche elektrische/elektronische Fehler (e/e-Fehler) eines FAS betrachtet und dafür Wahrscheinlichkeiten und Schadensschwere bestimmt. In Anlehnung an Ebel et al. (2010) und Huesmann et al. (2015) sollen hier aber im Sinne eines ganzheitlichen Ansatzes auch nicht-situationsadäquate Auslösungen und der Nutzenfall (Färber 2015) betrachtet werden. Weitzel (2013b) schlägt vor, auch für diese Fälle eine Expositionswahrscheinlichkeit und mögliche Schadensschwere zu ermitteln, um die Relevanz für die Kontrollierbarkeitsbewertung festzustellen. Gemäß ISO 26262-3 (2011, S.7) müssen bei der Risiko- und Gefahrenanalyse in der Konzeptphase zunächst nur Komponenten betrachtet werden, die nicht bereits in existierenden Systemen abgesichert wurden. Da Notbremssysteme schon in Serienreife existieren und in diesem Rahmen bezüglich Kontrollierbarkeit bewertet wurden (u.a. Färber und Maurer 2005; Fecher et al. 2009; Kobiela und Engeln 2010), steht im weiteren Verlauf der Betrachtungen die Komponente Ausweichen der zu bewertenden KAB-Systeme im Fokus.

In einem Top-Down Ansatz werden zunächst unter Vernachlässigung der genauen Ursachen mögliche Gefahren sowohl bei Auslösungen eines Ausweichassistentensystems bei situationsadäquaten als auch in nicht-situationsadäquaten Fahrsituationen systematisch analysiert. Die genaue Spezifikation der Funktion soll hier auch noch nicht entscheidend sein, Fahrer- und Umwelteinflüsse aber durchaus betrachtet werden.

In diesem Zusammenhang kristallisieren sich die in Tabelle 10 zusammengestellten Gefahrensituationen heraus. Diese werden in Anlehnung an die ISO 26262-3 (2011) in ihrer Schadensschwere bewertet. Dabei wird auf die Darstellung von Situationen unterhalb der Schadensschwere S2 ("ernste und lebensbedrohliche Verletzungen") verzichtet, da diese in der Regel bei der Absicherung der Worst-Case-Fälle gleichzeitig adressiert werden. So wäre ein leichtes Streifen eines Fahrzeuges als mögliches Hindernis, das mit Schadensschwere S0 für "keine Verletzten" bewertet wäre, z.B. bei Gefahrensituation 2 unterzuordnen. Die in Tabelle 10 angegebenen Schadensschweren sind deshalb auf den Worst-Case bezogen, was am Beispiel von Gefahrensituation 2 ein Fußgänger als Hindernis wäre, weshalb hier auch die Schwere S3 ("lebensbedrohliche oder tödliche Verletzungen") zugeordnet wird. Es wird nach Situationen unterschieden, in denen tatsächlich ein seitliches Hindernis das Ausweichmanöver auslöst und sogenannte Falschauslösungen, die ohne ersichtlichen Grund stattfinden, also nicht situationsadäquat sind.

Tabelle 10: Identifizierte Gefahrensituationen

	situationsadäquat	nicht situationsadäquat
1. Abkommen des Fahrzeuges mit Ausweichassistentensystem von der Fahrbahn (S2)		
2. Zusammenstoß mit Hindernis (S3)		
3. Zusammenstoß von Fahrzeug mit Ausweichassistentensystem mit entgegenkommendem Verkehrsteilnehmer (S3)		
4. Abkommen eines entgegenkommenden Verkehrsteilnehmers von der Fahrbahn (S2)		

Im nächsten Schritt werden die möglichen Ursachen für den Eintritt der genannten Gefahrensituationen betrachtet und deren Wahrscheinlichkeit wieder in Anlehnung an die ISO 26262-3 (2011) abgeschätzt (vgl. Tabelle 11). Diese wird von E1 ("sehr gering") über E2 ("gering"), E3 ("mittel") bis E4 ("hoch") eingestuft.

Tabelle 11: Mögliche Ursachen für Gefahrensituationen mit Wahrscheinlichkeit

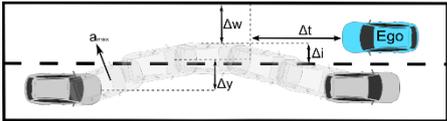
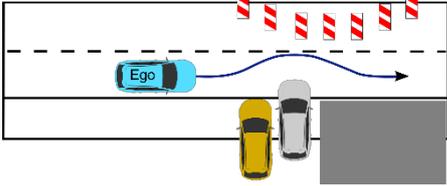
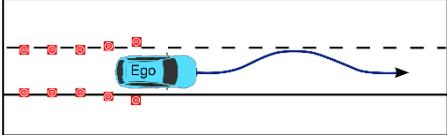
	Mögliche Ursache (mit Wahrscheinlichkeit):
1. Abkommen des Fahrzeuges mit Ausweichassistenzsystem von der Fahrbahn (S2)	<ul style="list-style-type: none"> • Schreckreaktion des Fahrers (E1) • Fehlerhafte Interaktion Funktion - Fahrer (E1)
2. Zusammenstoß mit Hindernis (S3)	<ul style="list-style-type: none"> • System greift nicht oder fehlerhaft ein (E3) • Schreckreaktion des Fahrers (E1) • Fehlerhafte Interaktion Funktion - Fahrer (E2)
3. Zusammenstoß von Fahrzeug mit Ausweichassistenzsystem mit entgegenkommendem Verkehrsteilnehmer (S3)	<ul style="list-style-type: none"> • System-Falschauslösung oder Funktionsfehler (E2) • Schreckreaktion des Fahrers (E1) • Fehlerhafte Interaktion Funktion - Fahrer (E2)
4. Abkommen eines entgegenkommenden Verkehrsteilnehmers von der Fahrbahn (S2)	<ul style="list-style-type: none"> • Schreckreaktion des anderen Verkehrsteilnehmers (E1)

Ein Abkommen von der Fahrbahn durch Schreckreaktionen ist, unter Berücksichtigung von Unfallzahlen, als sehr unwahrscheinlich einzustufen (vgl. DESTATIS 2013). Ergebnisse existierender Untersuchungen lassen die gleiche Wahrscheinlichkeit mit dem Eingriff in die Querführung als Ursache vermuten. Eine Kollision mit dem Gegenverkehr könnte aus diversen Gründen möglich sein, funktionsseitig z.B. durch Falschauslösungen wegen Sensorfehlern oder zu starkem Auslenken. Je nach Schnittstellengestaltung könnten Überlagerungseffekte zwischen System und Fahrer auftreten, wenn auch mit geringer Wahrscheinlichkeit. Sollte das System nicht adäquat funktionieren, z.B. zu spät bzw. gar nicht eingreifen, der Fahrer einem Systemeingriff nicht folgen oder gar durch den Systemeingriff initiiert falsch reagieren, könnte eine Kollision mit dem Hindernis die Folge sein. Da diese Aspekte stark von der Systemgestaltung abhängen, sind die zugehörigen Wahrscheinlichkeiten zunächst konservativ geschätzt.

5.1.1 Generierung relevanter Testfälle

Aus den identifizierten Gefahren und den Abschätzungen des zugehörigen Risikos ist eine Ableitung von Testfällen zur Bewertung der Kontrollierbarkeit durch den Fahrer möglich. Dabei sollen, wie in Kapitel 3.1.1 beschrieben, Relevanz und Effizienz beim Auswahlprozess dominieren. Da in dieser frühen Phase der Entwicklung auch die Methodenentwicklung und -validierung eine Rolle spielen, soll dieser Aspekt ebenfalls bei der Generierung von Testfällen beachtet werden. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen Hinweise für die funktionale Gestaltung von späteren Seriensystemen liefern und Grenzen der Beherrschbarkeit aufzeigen. Aus diesen Überlegungen entstehen folgende Testszenarien:

Tabelle 12: Testfälle zur frühen Kontrollierbarkeitsbewertung von KAB-Systemen

Skizze:	Beschreibung/Fragestellung:
Testfall 1: 	Ausweichsystem greift im entgegenkommendem Fahrzeug ein. <ol style="list-style-type: none"> 1. Wo liegen die Grenzen der Beherrschbarkeit für andere Verkehrsteilnehmer (Ego)? 2. Werden Schreckreaktionen beim Ego-Fahrer beobachtet?
Testfall 2: 	Fahrer erlebt berechtigten Eingriff eines Ausweichsystems. <ol style="list-style-type: none"> 1. Wie reagiert der Fahrer? 2. Welchen Einfluss hat ein belegter Gegenfahrestreifen auf die Fahrerreaktion? 3. Spielt die Funktionsausprägung eine Rolle? 4. Werden Schreckreaktionen beobachtet?
Testfall 3: 	Fahrer erlebt nach Engstellen-Durchfahrt eine Falschauslösung eines Ausweichsystems <ol style="list-style-type: none"> 1. Wie reagiert der Fahrer? 2. Werden Schreckreaktionen beobachtet?

Testfall 1 (siehe Tabelle 12) adressiert Gefahrensituationen 3 und 4 (siehe Tabelle 10), wobei hierfür in Anlehnung an Fach et al. (2010) und Neukum et al. (2014) die Urteile und das Fahrerverhalten anderer Verkehrsteilnehmer für die Bewertung der Beherrschbarkeit herangezogen werden. Dadurch soll unter Berücksichtigung der Fahrsituation (berechtigte oder Falschauslösung) und der Funktionsausprägung eine Grenze ermittelt werden, bis zu der Eingriffe aus Sicht entgegenkommender Fahrer kontrollierbar sind.

Mit Testfall 2 (siehe Tabelle 12) können die Gefahrensituationen 1, 2 und 3 (siehe Tabelle 10) näher beleuchtet werden. Wie in Färber (2015) postuliert, wird bei kurzfristig eingreifenden Notfall-FAS auch die Fahrerreaktion im Nutzenfall der Kontrollierbarkeitsbewertung zugeordnet. Speziell für KAB- Eingriffe müssen neue Evaluationsverfahren z.B. mit der Prüfumgebung VIL noch validiert werden, wofür ein Vergleich mit bestehenden Verfahren im Realfahrzeug notwendig ist. Die Frage, wie Fahrer auf einen Eingriff reagieren, wenn ein bewegtes Fahrzeug die Gegenspur belegt, kann aufgrund der Beschränkungen im Realfahrzeug zunächst nicht gefahrlos untersucht werden. Im Sinne der Methodenentwicklung und -verifizierung soll deshalb auf ein Szenario mit statischer Belegung des Gegenfahrstreifens zurückgegriffen werden, um zunächst einen Abgleich mit der Prüfumgebung Realfahrzeug zu ermöglichen. Es stellt sich die Frage, welchen Einfluss ein solcher belegter Gegenfahrstreifen auf die Fahrerreaktion hat. Das könnte wiederum von der Charakteristik des Eingriffs abhängen, weshalb hier verschiedene Assistenzfunktionen zur Manifestierung der Aussagen verwendet werden sollen.

Die erforderliche Dynamik eines Ausweichmanövers im Notfall bedingt Eingriffsstärken, die bestehende Richtwerte für Eingriffe in die Querdynamik, die bei einer Falschauslösung als beherrschbar gelten (vgl. Neukum et al. 2008b), in der Regel überschreiten. Um dennoch erste Erkenntnisse zu erlangen, wie Fahrer auf solche intensiven Querdynamikeingriffe bei einer Falschauslösung reagieren, wird Testfall 3 (siehe Tabelle 12) generiert. Der Argumentation der Methodvalidierung folgend wird auch hier auf entgegenkommende Fahrzeuge und eine Begrenzung des Manöverraums zunächst verzichtet. Um den Fahrer möglichst mittig im Fahrstreifen zu positionieren und den Eindruck einer Engstelle aufrecht zu erhalten, findet der Falsch-Eingriff am Ende einer Pylonengasse statt.

5.1.2 Ableiten von Pass-/Fail-Kriterien

Auch wenn die vorgestellten Testfälle nicht für eine finale Kontrollierbarkeitsbewertung vor Markteinführung dienen, sollen dennoch Kriterien gefunden werden, die eine klare Beherrschbarkeitsgrenze aufzeigen. Diese Kriterien sollen im Sinne der Methodenentwicklung bei der Untersuchung der Testfälle überprüft werden. Übergreifend über alle Testfälle werden hierfür Kollisionen, ein Verlassen der Fahrbahn und mögliche ESP-Eingriffe, als Indikator für einen fahrdynamischen Grenzzustand, als nicht kontrollierbare Ereignisse gewertet. In Kombination dazu sollen die Subjektivurteile der Fahrer anhand

dem in Kapitel 3.1.2 vorgestellten Verfahren mit der Skala zur Bewertung von Fahr- und Verkehrssituationen (SBFV) erhoben werden. Mehr als 15% an Urteilen im Bereich "gefährlich" sollen dabei als Indikator für ein nicht kontrollierbares Ereignis dienen. Bei der Erfassung von weniger als 15% "gefährlich"-Urteilen dient das beschriebene sequentielle Verfahren im direkten Abgleich mit objektiven Messdaten als mögliches Fail-Kriterium.

5.2 Testfall 1: Kontrollierbarkeit von Ausweichsystemen aus Sicht anderer Verkehrsteilnehmer

5.2.1 Expertenevaluation zur Eingrenzung von Versuchsbedingungen

Die empirische Untersuchung von Testfall 1 erforderte zunächst eine Identifizierung von Charakteristika einer Ausweichfunktion, die für die äußere Wahrnehmung durch entgegenkommende Verkehrsteilnehmer entscheidend sind. Zu diesem Zweck wurden von einem Expertengremium aus Ingenieuren und Human-Factors-Spezialisten die Eigenschaften von Ausweichsystemen analysiert und Parameter zur Beschreibung dieser Charakteristika abgeleitet (vgl. Abbildung 55). Dazu zählt zum einen die Zeitlücke Δt zwischen dem ausweichenden Fahrzeug am höchsten Punkt der Ausweichtrajektorie und dem entgegenkommenden Ego-Fahrzeug. Zum anderen wurde der Querversatz Δy und die daraus resultierende Eindringtiefe in den Gegenfahrstreifen Δi bzw. die Breite der entstehenden Engstelle Δw einbezogen. Die Dynamik der Ausweichbewegung soll durch die maximale Querbeschleunigung a_{\max} beschrieben werden. Zur Berechnung des Trajektorienverlaufs werden die in Winner (2012, S.529-534) vorgestellten Formeln für Ausweichmanöver verwendet.

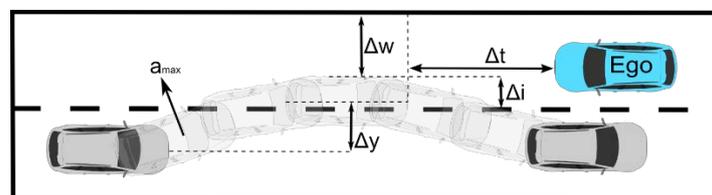


Abbildung 55: Parameter zur Charakterisierung von Ausweichtrajektorien

Die tatsächliche Relevanz der einzelnen Parameter für die Wahrnehmung aus Gegenverkehrs-Perspektive wurde im Rahmen eines Vorversuches durch zwölf Experten bewertet. Dazu erlebten sie im VIL je zwölf verschiedene Ausweichmanöver aus Kombinationen der in Tabelle 13 dargestellten Werte.

Tabelle 13: Parameter im Vorversuch

Querversatz / Eindringtiefe / Gassenbreite	Zeitlücke	max. Querbeschleunigung
$\Delta y = 1 \text{ m} / \Delta i = 0.25 \text{ m} / \Delta w = 3.25 \text{ m}$	$\Delta t = 1 \text{ s}$	$a_{\max} = 5 \text{ m/s}^2$
$\Delta y = 2 \text{ m} / \Delta i = 1.25 \text{ m} / \Delta w = 2.25 \text{ m}$	$\Delta t = 2 \text{ s}$	$a_{\max} = 7.5 \text{ m/s}^2$
		$a_{\max} = 10 \text{ m/s}^2$

Die Auswahl der Werte in Tabelle 13 erfolgte aus folgenden Gründen: Die Parameter des Querversatzes sollten in Gassenbreiten resultieren, die bei der Ermittlung der KON-Parameter bereits mit dem Realfahrzeug verglichen wurden. Bei $\Delta y = 1 \text{ m}$ dringt das ausweichende Fahrzeug nur sehr knapp ($\Delta i = 0.25 \text{ m}$) in den Gegenfahrstreifen ein, was bei einer Fahrstreifenbreite von 3.5 m in einer Engstelle von 3.25 m zwischen Ausweicher und Fahrbahnrand resultiert. Eine Engstelle von 2.25 m, die von Fahrern im Mittel als „unangenehm“ bis „gefährlich“ eingestuft wurde, resultiert bei einem Querversatz von 2 m bei mittlerer Spurposition. Der Reibwert von trockenen Fahrbahnen und optimalen Reifen lässt bei Querbeschleunigungen maximale Werte von etwa 10 m/s^2 zu (Winner 2012, S. 529). Das Minimum an nötiger Querbeschleunigung für ein erfolgreiches Ausweichmanöver ist abhängig von Geschwindigkeiten und Ausweichversatz, ergibt sich aber gemäß Winner (2012, S. 530, Formel 33.10) auf etwa 5 m/s^2 . Da von idealen Reibwert-Bedingungen nicht ausgegangen werden kann, aber gleichzeitig höhere Dynamik geringere Abstände zu Hindernissen bei Beginn eines Manövers zulassen, werden künftige Systeme wohl im Mittel bei ca. 7.5 m/s^2 ausgelegt werden. Die Zeitlücke zur Ausweichsituation soll so gewählt sein, dass einerseits eine Fahrerreaktion zur Entschärfung der Situation erforderlich, andererseits aber unter Berücksichtigung der menschlichen Informationsverarbeitung auch möglich ist. Als passende Werte kristallisierten sich während erster Tests eine und zwei Sekunden Abstand zum höchsten Punkt der Ausweichtrajektorie heraus.

Die aus der Kombination der Parameter in Tabelle 13 resultierenden Ausweichtrajektorien wurden in die Simulationssoftware "Virtual Test Drive" integriert. Zur besseren Vergleichbarkeit war das Szenario immer gleich gewählt und lediglich die Ausweichtrajektorie wurde variiert. In einem Kreuzungsszenario mit stark bremsendem Rechtsabbieger, wie in Abbildung 56 zu sehen, griff das Ausweichsystem im nachfolgenden Fahrzeug ein und führte dieses bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h auf der berechneten Trajektorie um das Hindernis herum. Nach jeder Ausweichsituation, die in pseudorandomisierter Rei-

henfolge variiert waren, wurden die Experten nach ihrer Einstufung der Fahrsituation anhand der SBFV-Skala befragt. Durch diese Einschätzung und die während der Fahrt aufgezeichneten Fahrdaten zeichnete sich ein erstes Bild von der Wirkung von Ausweichtrajektorien auf andere Verkehrsteilnehmer ab.

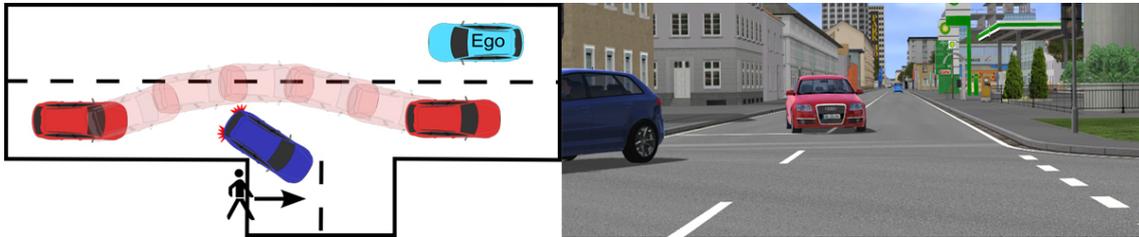


Abbildung 56: Ausweichsituation schematisch (links) und aus Ego-Perspektive (rechts)

Wie in Abbildung 57 links zu sehen, wurden Trajektorien von nur einem Meter Querversatz durchweg harmlos beurteilt. Der minimale Abstand zum ausweichenden Fahrzeug war, ausgehend von einem Meter Querversatz, zwar bei einer Zeitlücke von einer Sekunde im Mittel über 50 cm größer als bei zwei Sekunden (vgl. Abbildung 57 rechts), das schien die subjektive Beurteilung aber nicht weiter zu beeinflussen. Anders stellt sich dieses Bild bei einem Querversatz von zwei Metern dar. Hier lagen die Subjektivurteile alle im Bereich "unangenehm", bei einer Zeitlücke von einer Sekunde erreichten sie im Mittel sogar die Kategorie "gefährlich". Passend zu diesen kritischen subjektiven Beurteilungen waren auch die minimalen Abstände bei dieser Parameterkombination am geringsten. Die Dynamik des Ausweichmanövers, die durch die maximale Querbeschleunigung repräsentiert wird, schien keinen entscheidenden Einfluss auf die Wahrnehmung der entgegenkommenden Fahrer zu haben.

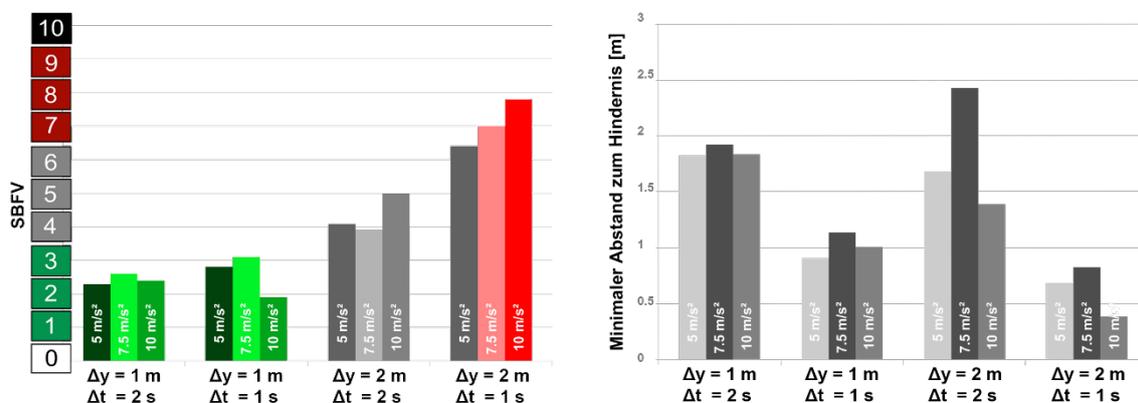


Abbildung 57: Ergebnisse des Expertenversuches

In Anbetracht dieser Resultate und der Prämisse möglichst effizient zu testen, kann der Einfluss der maximalen Querbeschleunigung für Probandenversuche als gering betrachtet

werden und muss nicht als unabhängige Variable variiert werden. Der Argumentation bei der Auswahl der Parameter für den Expertenversuch folgend erweist sich eine maximale Querbeschleunigung von 7.5 m/s^2 als realistische Abschätzung für künftige Systeme und somit auch für den Einsatz in Kontrollierbarkeitsuntersuchungen. Da es ein Ziel der Untersuchung von Testfall 1 ist, eine möglichst genaue Grenze der Beherrschbarkeit zu finden, kann der Querversatz von nur einem Meter als zu gering für anschließende Untersuchungen eingestuft werden. Deshalb wird stattdessen ein Querversatz von $\Delta y = 1.5 \text{ m}$ für weitere Betrachtungen gewählt. Die dadurch entstehende Engstellenbreite von $\Delta w = 2.75 \text{ m}$ ist ebenfalls im Rahmen der KON-Parameter zwischen VIL und dem Realfahrzeug verglichen worden (vgl. S. 61). Die bewerteten Zeitlücken hatten Einfluss auf objektive und subjektive Urteile und sollen deshalb wie im Vorversuch beibehalten werden. Als Resultat des Expertenversuches kristallisieren sich die in Tabelle 14 aufgeführten Parameter-Sets heraus, die im weiteren Verlauf evaluiert werden sollen.

Tabelle 14: Parameter-Sets für den Probandenversuch

Set	Querversatz / Eindringtiefe / Gassenbreite	Zeitlücke	max. Querbeschleunigung
1	$\Delta y = 2 \text{ m} / \Delta i = 1.25 \text{ m} / \Delta w = 2.25 \text{ m}$	$\Delta t = 1 \text{ s}$	$a_{\max} = 7.5 \text{ m/s}^2$
2	$\Delta y = 1.5 \text{ m} / \Delta i = 0.75 \text{ m} / \Delta w = 2.75 \text{ m}$	$\Delta t = 1 \text{ s}$	$a_{\max} = 7.5 \text{ m/s}^2$
3	$\Delta y = 2 \text{ m} / \Delta i = 1.25 \text{ m} / \Delta w = 2.25 \text{ m}$	$\Delta t = 2 \text{ s}$	$a_{\max} = 7.5 \text{ m/s}^2$
4	$\Delta y = 1.5 \text{ m} / \Delta i = 0.75 \text{ m} / \Delta w = 2.75 \text{ m}$	$\Delta t = 2 \text{ s}$	$a_{\max} = 7.5 \text{ m/s}^2$

5.2.2 Probandenversuch: Versuchsdesign

Die im Expertenversuch ermittelten Parameter-Sets sollen nun in geeigneten Fahrsituationen bezüglich ihrer Kontrollierbarkeit durch entgegenkommende Fahrer bewertet werden. Für den späteren Nutzenfall sind Applikationen zum Fußgängerschutz, sowie zur Vermeidung von Auffahrunfällen im urbanen Verkehr angedacht (vgl. Dang et al. 2012). Überraschender könnte aber für entgegenkommende Fahrer eine Falschauslösung sein, da sie sich nicht direkt aus dem Kontext der beobachteten Verkehrssituation antizipieren lässt. Aus diesen Überlegungen ließen sich drei Fahrsituationen ableiten, in denen Ausweichsysteme mit den Eigenschaften der ermittelten Parameter-Sets von Probanden beurteilt werden können.

In Situation 1 muss ein Rechtsabbieger durch einen querenden Fußgänger stark verzögern (vgl. Abbildung 58). Im nachfolgenden roten Fahrzeug greift ein Ausweichsystem zur

Vermeidung einer Kollision ein. Am rechten Fahrbahnrand begrenzt ein wartendes Fahrzeug den Manöverraum für die Versuchsperson auf die Ausmaße des eigenen Fahrstreifens. In Fahrsituation 2 stellt ein spielendes Kind, das plötzlich auf die Straße rennt, den Grund für den Eingriff eines Ausweichsystems dar. Wie bei der vorherigen Situation wird der rechte Fahrbahnrand durch ein parkendes Fahrzeug begrenzt. Auch in Situation 3 ist dieses parkende Fahrzeug am rechten Fahrbahnrand vorhanden, allerdings gibt es hier keinen ersichtlichen Grund für eine Auslösung des Assistenzsystems. Um eine Vergleichbarkeit der Situationen zu gewährleisten, sind die Konfliktpartner immer vom selben Fahrzeugtyp und -farbe (vgl. Abbildung 58).



Abbildung 58: Fahrsituationen: Rechtsabbieger (links), Kind (Mitte) und Falschauslösung (rechts) aus der Sicht des Fahrers

Aus versuchstechnischen Gründen und weil die erwarteten Unterschiede für den Faktor "Fahrsituation" am geringsten waren, erlebte jeder Fahrer diese drei Fahrsituationen in einem Within-Subjects-Design. Dabei bekam ein Fahrer immer dasselbe Parameter-Set. Um die benötigte Stichprobengröße für den Between-Design-Vergleich der Parameter-Sets zu ermitteln, wurde ausgehend von den gefundenen Unterschieden und Standardabweichungen zwischen den Parameter-Sets im Vorversuch eine Power-Analyse durchgeführt (siehe Kapitel 3.1.4). Bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = .05$ wurden bei vier Parameter-Sets, bei Annahme der Größenunterschiede zwischen den Sets aus den Vorversuchen, Effektgrößen von $f = .559$ erwartet und somit mindestens $n = 40$ VPn benötigt. Um für robuste post-hoc Vergleiche mit t-Tests zwischen einzelnen Sets ausreichend große Gruppen zur Verfügung zu haben, empfiehlt es sich gemäß Winter (2013, S. 2), die Gruppengröße auf mindestens zwölf VPn zu erhöhen, was eine Gesamtstichprobe von $n = 48$ VPn bedeutete. Der hieraus resultierende ausbalancierte und systematisch variierte Versuchsplan ist im Anhang A, Tabelle 17 zu finden.

Da eine Versuchsperson drei Ausweichsituationen erleben sollte, die aufgrund der Vergleichbarkeit ähnliche Fahrzeuge beinhalteten, wurde eine Coverstory verwendet (vgl. Kapitel 3.1.5), damit Probanden bei einem roten entgegenkommenden Fahrzeug nicht

unbedingt eine Konfliktsituation erwarteten. Dazu sollte der eigentliche Untersuchungsgegenstand der Studie bis zur letzten Situation nicht bekannt sein. Stattdessen wurde eine Validierung des VIL bezüglich der Fahrerinteraktion mit einem Tempomat im urbanen Verkehr als Ziel der Studie vorgegeben. Den Probanden wurde erklärt, dass in der Vergangenheit im Realfahrzeug eine Studie im freien Feld durchgeführt wurde, die nun zu Vergleichszwecken im VIL rekonstruiert werden soll. Zur Plausibilisierung wurde im Vorfeld des Versuches die Interaktion mit dem Tempomat geübt und im Versuch nach jeder Fahrsituation Fragen zum Umgang mit dem Tempomat gestellt (siehe Fragebögen im Anhang B). Gleichzeitig wurden die Fahrer aber auch um eine Beurteilung der Fahrsituation anhand der SBFV gebeten, was gleichzeitig die Coverstory unterstützte, aber hinterher auch der Beantwortung der Fragestellung diene. Des Weiteren durchfuhren die Probanden während des gesamten Versuchs eine sehr belebte Stadt und zwischen den untersuchten Ausweichsituationen wurden zur Verschleierung weitere Fahrsituationen wie Naheinschere oder plötzlicher Gegenverkehr bei einem Überholvorgang eingestreut. Erst nach der letzten Ausweichsituation wurden die Probanden aufgeklärt und Fragen zu den erlebten Ausweichtrajektorien gestellt (vgl. Fragebögen im Anhang B). Durch dieses Design kann davon ausgegangen werden, dass die Probanden wussten, dass sich Fahrsituationen ereignen werden, auf die sie reagieren sollten und sie deshalb besonders aufmerksam fuhren. Die um ca. 0.3 s langsameren Reaktionszeiten im VIL auf Objekte mit lateraler Geschwindigkeitskomponente, die aus den KON-Parametern im Vergleich zum Realfahrzeug ermittelt wurden, sollten dadurch zum Teil kompensiert werden. Reaktionszeiten bei erwarteten Ereignissen sind um etwa diesen Betrag (0.23 s im Mittel bei Fitch et al. (2010)) im Vergleich zu unerwarteten verkürzt. Durch die Coverstory wurden zudem vordefinierte Bedingungen bezüglich der Geschwindigkeitswahl geschaffen, da Fahrer, wie dafür in Engström und Ljung Aust (2011) vorgeschlagen, mit Tempomat fahren, der im Versuch auf 50 km/h eingestellt war.

5.2.3 Probandenversuch: Stichprobe

An der vorliegenden Probandenstudie nahmen 48 Fahrer im Alter zwischen 21 und 58 Jahren teil, die im Mittel 27.2 ($sd = 9.1$) Jahre alt waren. Davon war ein Viertel weiblich, der Rest männlichen Geschlechts. Alle Probanden besaßen eine gültige Fahrerlaubnis und mehr als 10.000 km Fahrerfahrung. Insgesamt beschreibt die Stichprobe die in Kapitel

3.1.4 für Kontrollierbarkeitsfragen geforderten Normalfahrer ohne besondere Beeinträchtigung.

5.2.4 Probandenversuch: Auswertung und Ergebnisse

Im Fahrversuch wurden neben den mit Fragebögen erhobenen subjektiven Daten auch Fahrzeugdaten zur Analyse objektiver Variablen aufgezeichnet. Hierbei lieferte die im VIL integrierte Inertialmesseinheit iTrace F200 Positionsdaten, während andere Fahrzeugsignale über CAN-Bus bzw. Flexray abgegriffen wurden. Die Ermittlung der relevanten abhängigen Variablen aus diesen Signalen erfolgte im Anschluss an die Versuche teilautomatisiert über Matlab-Skripte. Die so aufbereiteten Daten konnten statistisch ausgewertet werden. Im vorliegenden Mixed-Subjects-Design wird zunächst für jede abhängige Variable bestimmt, ob die Faktoren "Parameter-Set" und "Fahrsituation" einen signifikanten Haupteffekt bzw. Interaktionseffekte auf sie aufweisen. Dies geschieht durch Berechnung einer zweifaktoriellen Varianzanalyse (vgl. Bortz und Schuster 2010, S. 237-248). Ist ein signifikanter Haupteffekt zu finden (akzeptiertes Signifikanzniveau: $\alpha = .05$), kann über Post-hoc-Tests genauer bestimmt werden, zwischen welchen Parameter-Sets bzw. Fahrsituationen die Unterschiede liegen. Dafür wird das akzeptierte Signifikanzniveau über eine Bonferroni-Korrektur gemäß Bortz und Schuster (2010, S. 232) angepasst (Parameter-Sets: $\alpha = .014$, Fahrsituation: $\alpha = .017$). Zusätzlich werden Effektgrößen nach Field (2013, S. 472) für Varianzanalysen und Pearson's r für Post-hoc-Tests berechnet (Field 2013, S. 532). Dabei gelten Effektgrößen von $r < .3$ als klein, über $.5$ als groß und dazwischen als mittel (Field 2013, S. 82). Signifikante Interaktionseffekte würden bedeuten, dass z.B. signifikante Unterschiede zwischen Parametersätzen nur bei bestimmten Fahrsituationen zu finden sind oder umgekehrt. Zur Diskussion und Interpretation dieser Effekte eignen sich Boxplots, die entsprechend der Faktoren gruppiert dargestellt werden. Werte, die eine z-Transformation von ± 3.29 über-/unterschreiten werden gemäß Field (2013, S. 32) als Ausreißer angesehen und für die Auswertung nicht in Betracht gezogen.

Reaktionszeit

Die Reaktionszeit wurde ab dem Zeitpunkt bestimmt, an dem das ausweichende Fahrzeug die Fahrstreifengrenze mit einem Rad überschritten hatte. Sobald die Fahrer das Bremspedal betätigten, wurde dieser Zeitpunkt als Reaktionszeit gewertet, bei einem Lenkmanöver diente ein Lenkradwinkel über 10° als Indikator für den Beginn einer Reaktion. Bei

einer kombinierten Reaktion wurde die jeweils kürzere Reaktionszeit von beiden ermittelten gewertet. Eine Varianzanalyse für gemischte Versuchsdesigns (Mixed-Subjects-ANOVA) ergibt einen signifikanten Haupteffekt für die Faktoren "Fahrsituation" ($F(2,70) = 26.440$, $p < .001$, $r = .656$) und "Parameter-Set" ($F(3,35) = 3.849$, $p = .018$, $r = .498$). Es wurden keine signifikanten Interaktionseffekte festgestellt ($F(6,70) = 1.416$, $p = .221$, $r = .328$). In Abbildung 59 sind die Reaktionszeiten nach Parameter-Set und nach Fahrsituation gruppiert als Boxplot aufgetragen.

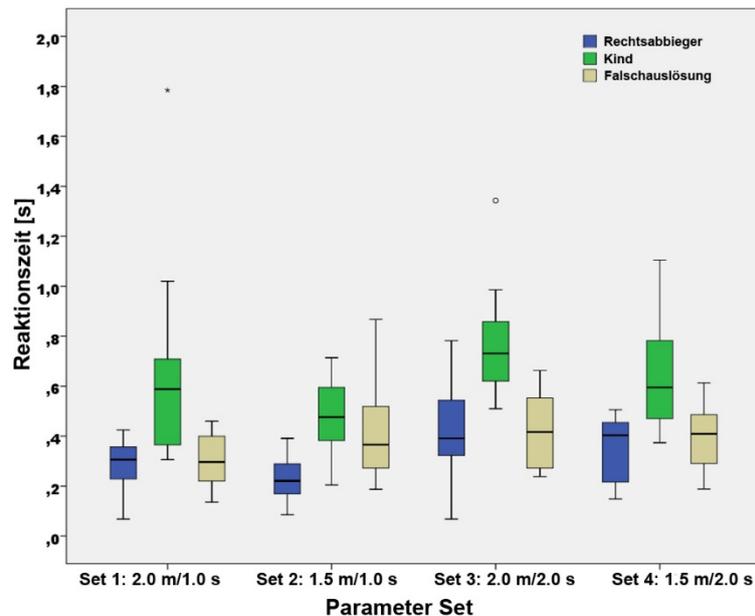


Abbildung 59: Reaktionszeiten nach Parameter-Set und Fahrsituation ($n = 144$)

Es ist zu erkennen, dass die Reaktionszeiten bei der Fahrsituation "Kind" deutlich länger sind, als bei den anderen beiden. Dieser Eindruck wird durch die Post-hoc-Tests in Anhang C, Tabelle 30 manifestiert, bei denen signifikante Unterschiede mit großen Effektgrößen gefunden wurden. Signifikante Unterschiede zwischen den Parameter-Sets finden sich nur zwischen Set 2 und Set 3 (vgl. Anhang C, Tabelle 30).

Abstand zum ausweichenden Fahrzeug

Der minimale Abstand zum ausweichenden Fahrzeug wurde euklidisch zwischen den Außenhüllen der Fahrzeuge unter Vernachlässigung der Außenspiegel bestimmt. Die in den KON-Parametern gefundenen Abweichungen in der Spurposition bei der Durchfahrt von Engstellen sind bei der Auswertung berücksichtigt worden und entsprechend für die resultierenden Engstellen korrigiert. Eine Mixed-Subjects-ANOVA ergibt einen signifikanten Haupteffekt für die Faktoren "Fahrsituation" ($F(2,88) = 51.908$, $p < .001$, $r = .735$)

und "Parameter-Set" ($F(3,44) = 101.724$, $p < .001$, $r = .935$). Es werden zudem signifikante Interaktionseffekte zwischen den beiden Faktoren festgestellt ($F(6,88) = 11.846$, $p < .001$, $r = .669$).

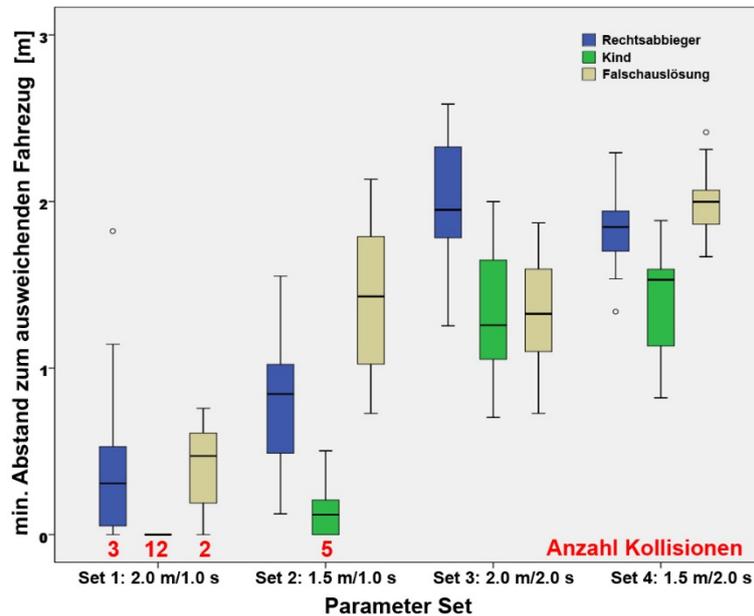


Abbildung 60: Minimaler Abstand zum ausweichenden Fahrzeug nach Parameter-Sets und Fahr situation ($n = 144$)

In Abbildung 60 sind die minimalen Abstände und die Anzahl der Kollisionen aufgetragen. Zunächst fällt auf, dass bei der Situation Kind die Abstände bei jedem Parameter-Set am geringsten waren und sich 17 von 22 Kollisionen bei dieser Fahr situation ereigneten. Dieser Eindruck wird durch die Post-hoc-Tests bestätigt, die signifikante Unterschiede zwischen der Situation Kind und den beiden anderen zeigen (vgl. Anhang C, Tabelle 31). Ebenfalls 17 von 22 Zusammenstöße wurden bei Parameter-Set 1 beobachtet. Auch die minimalen Abstände sind hier im Mittel deutlich unter einem Meter. Außer zwischen Parameter-Set 3 und 4 unterscheiden sich alle Sets signifikant voneinander (vgl. Anhang C, Tabelle 31). Bei diesen Sets traten keine Kollisionen auf und die mittleren minimalen Abstände sind alle über einem Meter. Bei Parameter-Set 2 liegen die minimalen Abstände je nach Fahr situation sehr deutlich auseinander. Die deutliche Differenz zwischen Falschauslösung und Rechtsabbieger, die bei allen anderen Sets nicht bzw. bei Set 3 geringer und umgekehrt vorhanden ist, erklärt auch die gefundenen signifikanten Interaktionseffekte.

Querversatz

Der Querversatz beschreibt die Differenz von maximaler lateraler Spurposition und der Ausgangsspurposition vor Beginn des Manövers. Eine Mixed-Subjects-ANOVA ergibt keinen signifikanten Haupteffekt für den Faktor "Fahrsituation" ($F(2,88) = 2.640$, $p = .077$, $r = .238$). Der Faktor "Parameter-Set" dagegen erzeugt einen signifikanten Haupteffekt ($F(3,44) = 4.131$, $p = .012$, $r = .469$). Es treten keine signifikanten Interaktionseffekte zwischen den beiden Faktoren auf ($F(6,88) = .533$, $p = .782$, $r = .187$). Wie in Abbildung 61 zu sehen, bewegen sich die hergestellten Querversätze im Mittel zwischen 30 und 60 Zentimetern. Die größten Querversätze wurden bei Parameter-Set 2 hergestellt, das sich auch signifikant von den Sets 3 und 4 unterscheidet. Bei Set 2 fällt die große Streuung bei der Situation "Kind" auf. Die ebenfalls hohe Streuung bei Parameter-Set 1, mit Ausnahme der "Falschauslösung", zeigt, dass Fahrer sehr unterschiedlich reagierten und wenige VPn große Querversätze von bis zu einem Meter herstellten. Bei der "Falschauslösung" konnte das nicht beobachtet werden.

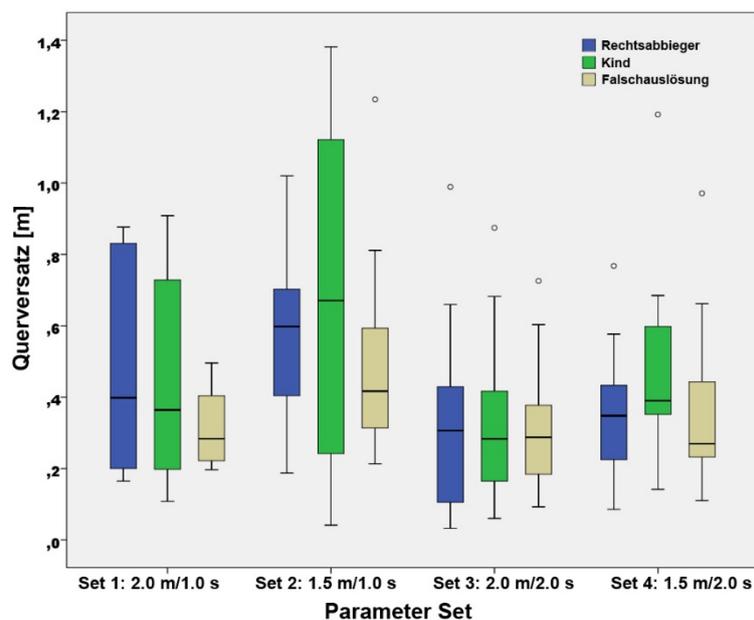


Abbildung 61: Querversatz nach Parameter-Sets und Fahrsituation ($n = 144$)

Auch wenn, wie in Anhang C, Tabelle 32 zu sehen, keine signifikanten Unterschiede im Vergleich der Mittelwerte vorliegen, sind die Streuungen bei den Parameter-Sets 1 und 2 je nach Fahrsituation verschieden.

Querbeschleunigung

Die maximale Querbeschleunigung wurde querab zur Fahrtrichtung gemessen, wobei für die Bestimmung des Maximums Beträge gebildet wurden. Eine Mixed-Subjects-ANOVA ergibt einen signifikanten Haupteffekt für die Faktoren "Fahrsituation" ($F(2,88) = 5.447$, $p = .006$, $r = .333$) und "Parameter-Set" ($F(3,44) = 15.043$, $p < .001$, $r = .711$). Es werden keine Interaktionseffekte zwischen den beiden Faktoren festgestellt ($F(6,88) = .058$, $p = .999$, $r = .063$).

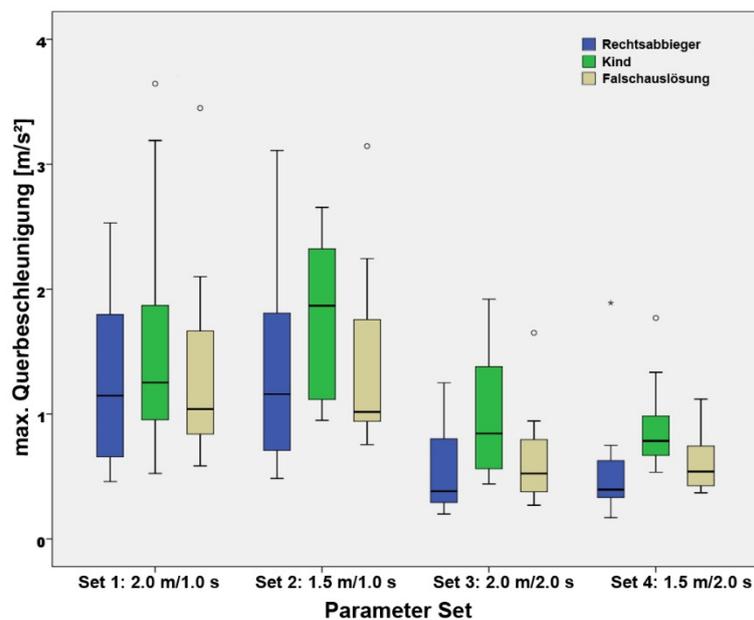


Abbildung 62: Maximale Querbeschleunigung nach Parameter-Sets und Fahrsituation ($n = 144$)

Wie in Abbildung 62 zu sehen, lagen die maximalen Querbeschleunigungen bei den Parameter-Sets 1 und 2 höher als bei den anderen beiden. Diese Unterschiede ergeben sich auch aus den Post-hoc-Tests, bei denen alle Sets außer 3 und 4 bzw. 1 und 2 signifikant unterschiedlich sind (siehe Anhang C, Tabelle 33). Bei den Fahrsituationen unterscheidet sich die Situation "Kind" signifikant von den beiden anderen. In Abbildung 62 ist zu sehen, dass die maximalen Querbeschleunigungen bei "Kind" höher liegen, am deutlichsten bei Parameter-Set 2. Alle gemessenen Werte liegen aber nicht im fahrdynamischen Grenzbereich, weshalb auch keine ESP-Eingriffe registriert wurden.

Längsverzögerung

Die Intensität der Bremsreaktion eines Fahrers wird durch die maximale Längsverzögerung charakterisiert. Eine Mixed-Subjects-ANOVA ergibt einen signifikanten Hauptef-

fekt für die Faktoren "Fahrsituation" ($F(2,88) = 34.873, p < .001, r = .666$) und "Parameter-Set" ($F(3,44) = 16.224, p < .001, r = .725$). Es werden keine signifikanten Interaktionseffekte festgestellt ($F(6,88) = 1.152, p = .396, r = .255$).

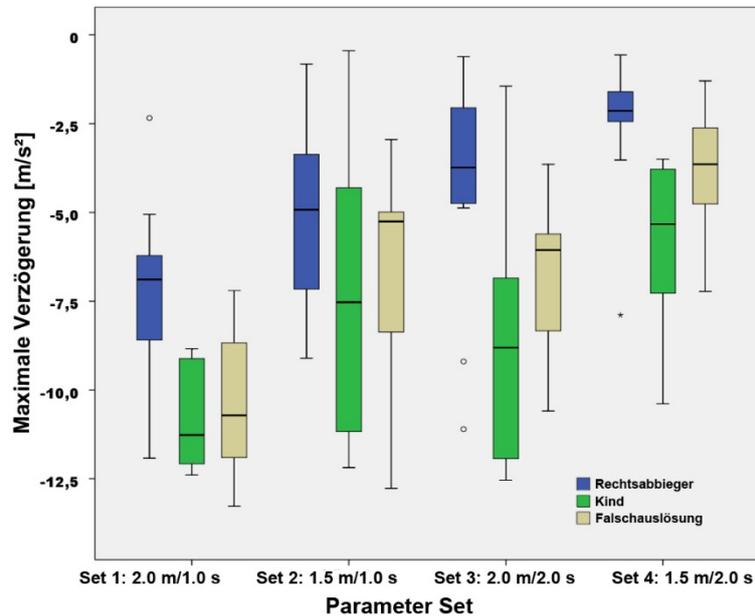


Abbildung 63: Maximale Verzögerung nach Parameter-Sets und Fahrsituation ($n = 144$)

Es zeigt sich eine deutliche Differenz zwischen der Situation "Rechtsabbieger" und den beiden anderen (vgl. Abbildung 63), welcher auch durch die signifikanten Unterschiede mit hohen Effektgrößen in den Post-hoc-Tests bestätigt wird (siehe Anhang C, Tabelle 34). Außer bei Parameter-Set 2 und 3 unterscheiden sich die maximalen Verzögerungen auch bei allen Parameter-Sets. In Abbildung 63 wird deutlich, dass viele Fahrer Vollbremsungen mit Intensitäten unter -10 m/s^2 durchgeführt haben. Vor allem bei Parameter-Set 1 und der Fahrsituation "Kind".

Subjektive Bewertung: SBFV-Urteil

Für die statistische Auswertung der subjektiven Urteile werden nonparametrische Tests gerechnet. Effektgrößen werden gemäß Field (2013, S. 257) bestimmt. Eine Friedman's ANOVA ergibt einen signifikanten Haupteffekt ($H(2) = 43.443, p < .001$) für den Faktor "Fahrsituation" und ein Kruskal-Wallis-Test indiziert, dass es einen signifikanten Unterschied durch den Faktor "Parameter-Sets" gibt ($H(3) = 41.268, p < .001$).

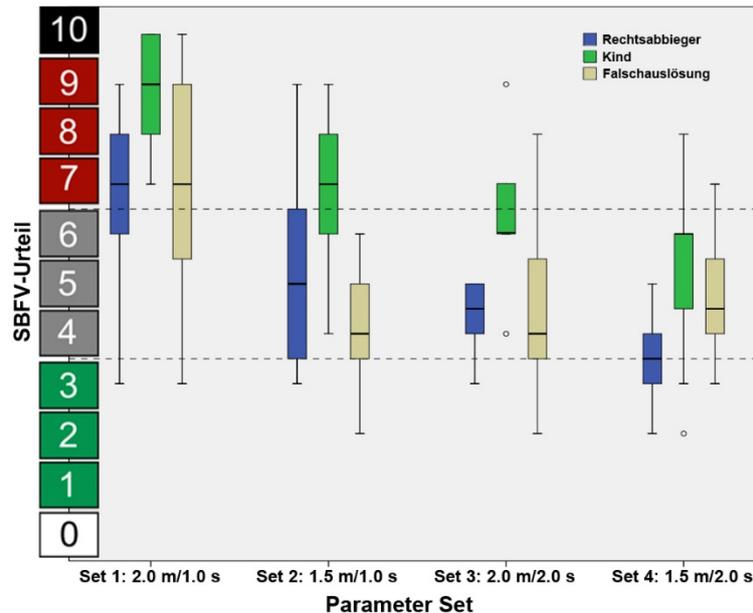


Abbildung 64: SBFV-Urteil nach Parameter-Sets und Fahr situation ($n = 144$)

Die Fahr situation "Kind" wurde von den Probanden signifikant kritischer beurteilt als die anderen, was aus den Post-hoc-Tests in Anhang C, Tabelle 35 und aus Abbildung 64 ersichtlich wird. Dabei wurden in der Situation "Kind" insgesamt 28 Urteile im Bereich "gefährlich" bzw. "nicht kontrollierbar" gezählt, was 58% aller Befragten entspricht, in den anderen Situationen nur jeweils 21% (zehn von 48). Diese Ratings verteilen sich mit 28 von 36 Urteilen oberhalb von "unangenehm" bei Parameter-Set 1 (78%), elf bei Set 2 (31%), sechs bei Set 3 (17%) und drei bei Set 4 (8%). Die "gefährlich"-Urteile bei den Sets 3 und 4 wurden im Einzelfall mit den zugehörigen objektiven Daten verglichen und dabei keine nicht kontrollierbaren Ereignisse festgestellt. Statistische Unterschiede zwischen den verschiedenen Parameter-Sets wurden teilweise mit Post-hoc-Tests gefunden, deren Ergebnisse in Anhang C, Tabelle 35 nachzulesen sind.

5.2.5 Interpretation der Ergebnisse

Die Resultate liefern Antworten auf verschiedene Aspekte, die bei Testfall 1 im Fokus der Untersuchung lagen. Die erste Erkenntnis ist, dass kein Fahrer eine Schreckreaktion zeigte, der einen Ausweichsystemeingriff in einem entgegenkommenden Fahrzeug erlebt hat. Kein Teilnehmer verlor durch wenig zielgerichtete Handlungen die Kontrolle über sein Fahrzeug oder kam von der Fahrbahn ab. Ganz im Gegenteil dazu konnten viele Fahrer durch geeignete Gegenmaßnahmen in Form von Brems- und Ausweichmanövern

ihrerseits eine Kollision verhindern. Dabei wurden zum Teil sehr heftige Reaktionen beobachtet, wie beispielsweise Vollbremsungen oder Ausweichbewegungen mit großem Querversatz. In Kombination mit den subjektiven Urteilen verdeutlicht das, dass die Fahrer die Kritikalität der Szenarien auf keinen Fall unterschätzt haben und entsprechend auf die Bedrohungen reagierten.

Es ist auffällig, dass sowohl bei der subjektiven Beurteilung, als auch bei den meisten objektiven Variablen die Fahrsituation "Kind" kritischere Ereignisse und heftigere Fahrerreaktionen auslöste als die anderen untersuchten Ausweichsituationen. Nach jeder Situation wurden den Probanden, neben ihrer Einschätzung der Kritikalität, noch weitere Fragen gestellt. Unter anderem, wie gut die Fahrsituation von ihnen gelöst wurde und was die Gründe dafür waren. Hier äußerte fast die Hälfte aller VPn, dass sie bei der Situation "Kind" zunächst einen Fußgänger am rechten Fahrbahnrand beobachteten, der sich aus einem Wohnhaus in Richtung Fahrbahn bewegte und dann dem Fußweg folgte (vgl. Abbildung 58, Mitte). Durch diese visuelle Ablenkung reagierten die Fahrer deutlich später, wodurch der Unterschied zu den anderen Fahrsituationen sehr wahrscheinlich erklärt werden kann. Diese im Versuchsdesign zunächst nicht vorgesehene Variable liefert dennoch wertvolle Erkenntnisse. Zum einen bietet die Prüfumgebung VIL die Möglichkeit, komplexe urbane Szenarien abzubilden, die Situationen und Ablenkungen hervorrufen können, wie sie auch im Realverkehr zu finden sind. Solche kurzen Phasen, in denen Fahrer ihre Aufmerksamkeit von der Straße abwenden, können die Ergebnisse von Kontrollbarkeitsuntersuchungen stark beeinflussen. Bisher existiert in keinem einschlägigen Werk zur Absicherung von FAS eine Aussage, in welcher Form der Aufmerksamkeitszustand des Fahrers bei Untersuchungen berücksichtigt werden muss und sollte deshalb Gegenstand weiterer Forschung sein. Zum anderen bedeutet die nicht vorgesehene Ablenkung aber, dass Pass-/Fail-Kriterien, die im Vorfeld festgelegt wurden, für diesen Fall nur bedingt angewandt werden können bzw. deren Gültigkeit noch einmal überprüft werden sollte.

Bei der Fahrsituation "Falschauslösung", bei der für die Fahrer kein Grund für das Ausweichmanöver des entgegenkommenden Fahrzeuges ersichtlich war, wurden die wenigsten Kollisionen gezählt. Im Vergleich zur Fahrsituation "Rechtsabbieger" bremsen die Probanden wesentlich stärker und stellen dafür etwas weniger Querversatz her. Die Fahrsituation "Rechtsabbieger" war für die Fahrer eine aus dem Straßenverkehr bekannte Si-

tuation, die viele zunächst nicht als Systemauslösung, sondern als rücksichtsloses Fahrerverhalten des Ausweichenden interpretierten. Fünf Probanden betätigten sogar die Hupe, um ihre Verärgerung auszudrücken, was nebenbei bemerkt ein Indiz für sehr authentisches Fahrerverhalten im VIL ist. Die Fahrsituation wurde möglicherweise als bekanntes Manöver eines rücksichtslosen Verkehrsteilnehmers interpretiert, bei der klar ist, dass das ausweichende Fahrzeug zügig wieder in seinen Fahrstreifen zurückkehren wird. Deshalb bremsen die Fahrer vermutlich weniger stark und versuchten vermehrt durch Steuern an den rechten Fahrstreifenrand die Situation zu entschärfen. Die Falschauslösung dagegen stellte eine unbekannte Situation dar, die einige Fahrer bei der Befragung als "Geisterfahrt" bezeichneten. Eine ähnliche Interpretation der Falschauslösung könnte ein Fahrfehler sein, bei dem sich nicht abzeichnet, dass der Fahrer sein Fahrzeug wieder unter Kontrolle bekommt. Deshalb reagierten wahrscheinlich viele Probanden zunächst mit heftigeren Bremsmanövern, da sie zu Beginn des Ausweichmanövers den weiteren Verlauf nicht abschätzen konnten. Als Resultat entschärfen sie die Gefahr stärker als in den anderen beiden Fahrsituationen.

Zusammenfassend spielt die Fahrsituation für die Bewertung der Kontrollierbarkeit eine entscheidende Rolle und muss aus methodischer Sicht, vor allem im Hinblick auf finale Kontrollierbarkeitsuntersuchungen vor Markteinführung eines Systems entsprechend des Untersuchungsziels gewählt werden.

Die Ergebnisse zeigen bei der Betrachtung des Faktors "Parameter-Set" deutliche Unterschiede. Bei den Parameter-Sets 1 und 2 mit einer Zeitlücke von $\Delta t = 1$ s wurden nicht kontrollierbare Ereignisse durch Kollisionen festgestellt. Dazu kamen weit mehr "gefährlich"-Urteile als in den Pass-Kriterien erlaubt, so dass diese Systemauslegung als nicht kontrollierbar angesehen werden muss. Anhand der objektiven Kriterien wurden bei den Parameter-Sets 3 und 4 keine nicht kontrollierbaren Ereignisse festgestellt. Allerdings lagen bei Parameter-Set 3 die "gefährlich"-Urteile mit 17% leicht über den akzeptierten 15%. Alle dieser Ratings wurden jedoch in der Fahrsituation "Kind" abgegeben. Wie zuvor dargelegt, muss die Gültigkeit der Pass-Fail-Kriterien in dieser Situation aufgrund der visuellen Ablenkung in Frage gestellt werden. Da die zugehörigen objektiven Daten dieser Urteile keine kritischen Ereignisse belegen und in beiden anderen Fahrsituationen kein subjektives Urteil im Bereich "gefährlich" zu finden ist, werden die Parameter-Sets 3 und 4 als kontrollierbar betrachtet. Damit kann eine klare Grenze für die Auslegung von Ausweichassistenzsystemen definiert werden. Demnach dürfen Systeme nur auslösen,

wenn mindestens eine Zeitlücke von $\Delta t = 2$ s vom höchsten Punkt der Trajektorie zum Gegenverkehr liegt. Zudem muss dem entgegenkommenden Fahrzeug mindestens eine Lücke von $\Delta w = 2.25$ m bleiben. Dieses Kriterium entstand bei der Annahme einer Fahrzeugbreite von ca. 2 m. In Anlehnung an Reichel (2013) könnte es aber auch auf eine Prozentangabe erweitert werden. Das würde bedeuten, die Lücke müsste mindestens 10% breiter sein als das eigene Fahrzeug. Weil die Untersuchung im urbanen Geschwindigkeitsbereich stattfand, sind die Ergebnisse auch nur dafür gültig.

Die Prüfumgebung VIL erwies sich dabei als geeignet, um kritische und komplexe Fahrsituationen zu testen und als sichere Plattform, um empirisch eine klare Grenze der Beherrschbarkeit für die Parametrierung von Ausweichassistenzsystemen zu bestimmen. Aussagen von Probanden und objektive Messwerte manifestieren die Annahme eines sehr realen Fahrerverhaltens der VPn, das bereits bei der Bestimmung der KON-Parameter attestiert wurde.

5.3 Testfall 2: Kontrollierbarkeit von Ausweichsystemen im Nutzenfall

Testfall 1 untersuchte die Gefahr der Kollision mit entgegenkommenden Fahrzeugen bei Auslösung von Ausweichsystemen aus Perspektive des Gegenverkehrs. Testfall 2 evaluiert diese Gefahrensituation aus Sicht des Fahrers mit System an Bord. Sollte ein Ausweichsystem eingreifen, obwohl der Gegenfahrstreifen belegt ist, könnte der Fahrer korrigierend eingreifen und einen Zusammenstoß verhindern. Testfall 2 soll deshalb untersuchen, ob Fahrer einen Ausweicheingriff, angepasst an die Fahrsituation korrigieren können, um gegebenenfalls Zusammenstöße mit Objekten auf dem Gegenfahrstreifen zu verhindern. Wie bei Testfall 1 ist das VIL Grundlage des methodischen Zugangs. Um die VIL-Methode als Gesamtansatz zu validieren, soll diese in Testfall 2 mit bewährten Untersuchungsmethoden verglichen werden.

Bevor die Umsetzung zur Beantwortung dieser Fragestellung vorgestellt wird, sollen noch einige Vorüberlegungen aufgeführt werden. Es liegt nahe, dass eine korrigierende Intervention des Fahrers auf einen Ausweicheingriff vermutlich stark von der Gestaltung der Funktion und von MMI-Aspekten abhängig ist. Existierende Befunde von Kleen und Schmidt (2009) nutzten einseitige Lenkmomente vom Hindernis weg um den nötigen

Spurversatz zu bewirken. Bei Sieber et al. (2013) wurden fahrerinitiierte Lenkbewegungen zur Erhöhung der Wirksamkeit verstärkt. Hesse et al. (2013) versuchten durch automatisches Ausweichen das Fahrzeug auf einer möglichst idealen Trajektorie um ein Hindernis zu lenken. Hier kamen zudem verschiedene Interaktionskonzepte zur Anwendung, die zum Teil haptische bzw. akustische Vorwarnung beinhalteten. Diese unterschiedlichen Ansätze zeigen, dass die Ausgestaltung möglicher Serienfunktionen zum Zeitpunkt der Untersuchung noch offen war. Die Evaluation sollte deshalb verschiedene Funktionsvarianten berücksichtigen.

5.3.1 Versuchsdesign

Um möglichst breit für verschiedene Systemausprägungen Erkenntnisse über die Beherrschbarkeit zu gewinnen, sollten zur Untersuchung von Testfall 2 mehrere Ausweichfunktionen überprüft werden.

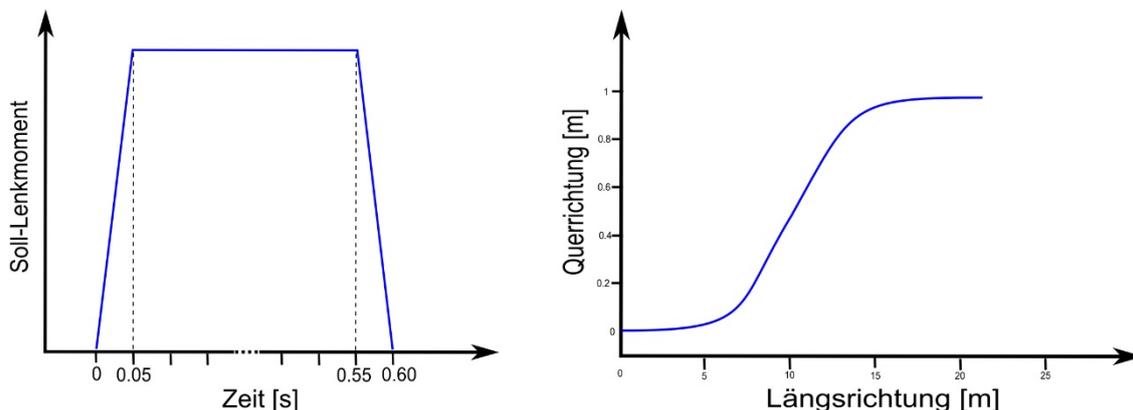


Abbildung 65: Gerichtetes Lenkmoment (links) und Soll-Ausweichtrajektorie (rechts)

Die getesteten Assistenzfunktionen umfassten zwei funktionale Ausprägungen. Beiden gemeinsam ist, dass als Aktor die EPS-Lenkung genutzt wurde, also alle Eingriffe auch am Lenkrad in voller Stärke zu spüren waren (nicht-entkoppeltes Lenkrad). Eine Funktion wird als „Ausweichempfehlung“ bezeichnet und stellte im Wesentlichen ein gerichtetes (in Fahrrichtung nach links), leicht geramptes Moment dar. Der genaue zeitliche Verlauf ist in Abbildung 65 links dargestellt. Bei der Assistenzfunktion „Führung“ wurde versucht eine Idealtrajektorie (siehe z.B. Abbildung 65, rechts) um das Hindernis herum abzufahren. Dabei wurde in Echtzeit ständig die Fahrereingabe am Lenkrad berücksichtigt und entsprechend der Abweichung von der Solltrajektorie das aktuelle Moment geregelt. Eine weitere Funktionsausprägung, „Führung mit Ton“, bedient sich derselben Funktion

wie "Führung". Um MMI-Aspekte zu adressieren, wurde zusätzlich während der Auslösung ein Warnton eingespielt. Bei allen Assistenzfunktionen war während des Eingriffs im Head-Up-Display ein Warnsymbol mit einem um ein Warndreieck herum führenden Pfeil angezeigt.

Tabelle 15: Gruppen im Versuchsplan

		<i>Between</i>							
		Keine Assistenz		Ausweichempfehlung		Führung		Führung mit Ton	
<i>Within</i>	VIL	frei 6VPn	belegt 6VPn	frei 6VPn	belegt 6VPn	frei 6VPn	belegt 6VPn	frei 6VPn	belegt 6VPn
	Realfahrzeug	frei 6VPn	belegt 6VPn	frei 6VPn	belegt 6VPn	frei 6VPn	belegt 6VPn	frei 6VPn	belegt 6VPn

Wie bereits erwähnt, sollte der Versuch sowohl in der Prüfumgebung VIL als auch im Realfahrzeug auf der Teststrecke stattfinden. Da zwischen den Prüfumgebungen nur kleine Unterschiede erwartet wurden, empfahl sich ein Within-Design (vgl. Tabelle 15). Die Hälfte der Probanden fand dabei einen freien Gegenfahrstreifen vor, die andere Hälfte, wie auf Seite 96 beschrieben, einen belegten. Die Fahrer wurden zudem in vier Gruppen eingeteilt, die jeweils eine Ausprägung der Assistenzfunktionen erhielten. Entweder sie erlebten die Variante „Ausweichempfehlung“, "Führung", "Führung mit Ton" oder "keine Assistenz", die als Vergleichsgruppe diente. Aus diesen Randbedingungen und groben Erwartungswerten aus Vorversuchen wurden zur Ermittlung der Gruppengrößen Power-Analysen gerechnet. Bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = .05$ ergab sich eine Mindestgruppengröße von elf VPn pro Assistenz-Ausprägung. Um für robuste post-hoc Vergleiche mit t-Tests zwischen einzelnen Sets ausreichend große Gruppen zur Verfügung zu haben, empfiehlt es sich gemäß Winter (2013, S. 2), die Gruppengröße auf mindestens zwölf VPn zu erhöhen, was eine Gesamtstichprobe von $n = 48$ VPn bedeutete. Der daraus resultierende ausbalancierte und systematisch variierte Mixed-Subjects-Versuchsplan ist im Anhang A, Tabelle 18 zu finden. Danach erlebte jeder Fahrer zwei identische Ausweichsituationen, wobei eine im VIL und eine im Realfahrzeug stattfand. Von rechts parkte, wie in Abbildung 66 zu sehen, bei einer TTC von 1.6 s ein Fahrzeug hinter einer Verdeckung aus. Für die Gewährleistung der Sicherheit und Reproduzierbarkeit im Teststreckenversuch wurde, wie in Abbildung 66 zu sehen, ein fotorealistisches Dummyfahrzeug über WLAN vom Versuchsträger aus aktiviert und durch ein Pneumatiksystem einen Meter in den Fahrstreifen gefahren. Bei einer TTC von 1.2 s griff dann jeweils

das entsprechende Ausweichsystem ein. In Abbildung 66 ist rechts die virtuelle Nachbildung des Teststreckenszenarios zu sehen.



Abbildung 66: Ausweichsituation auf der Teststrecke (links), mit belegtem Gegenfahrstreifen (Mitte) und im VIL (rechts)

Um den Fahrer bei möglichst beiden Auslösungen in einem naiven Zustand zu halten, wurde eine Coverstory verwendet. Danach wurde dem Fahrer ein Vergleich von Engstellen-Durchfahrten zwischen VIL und Realfahrzeug als Untersuchungszweck genannt. Laut Instruktion sollte die VPn möglichst mittig und mit 50 km/h im eigenen Fahrstreifen und durch verschiedene darin aufgebaute Engstellen fahren. Ein wechselndes Aktivieren von Blinker oder Scheibenwischer vor den Engstellen bewirkte eine fahrschulmäßige Handhaltung am Lenkrad, wodurch mögliche Störeffekte durch verschiedene Handhaltungen vermieden wurden. Die erste Ausweichsituation wurde im Nachhinein als einmaliger Test der jeweiligen Prüfumgebung für eine Folgestudie deklariert und versichert, dass diese Auslösung nicht der Hauptuntersuchungsgegenstand der Studie gewesen sei. Der Proband wurde befragt, wie er die Situation anhand der SBFV-Skala subjektiv beurteilt, da dies für die Folgestudie wichtig sei. Nach der zweiten Ausweichsituation in der jeweils anderen Prüfumgebung wurde der Fahrer dann aufgeklärt und zum erlebten Ausweichassistenzsystem befragt. Die dazugehörigen Fragebögen sind im Anhang B zu finden.

5.3.2 Stichprobe

An der Untersuchung nahmen 48 VPn teil, die zwischen 20 und 58 Jahre alt waren und somit den Durchschnittsfahrer ohne nennenswerte Einschränkungen repräsentieren. Zwei Drittel der Probanden waren männlich, 16 VPn waren weiblich. Der Altersdurchschnitt der Gesamtstichprobe lag bei 28,4 Jahren mit einer Standardabweichung von 9,4 Jahren. Alle Fahrer hatten eine gültige Fahrerlaubnis und mindestens 10.000 km Fahrerfahrung.

5.3.3 Auswertung und Ergebnisse

Analog zu Testfall 1 wurden neben den mit Fragebögen (zu finden im Anhang B) erhobenen subjektiven Daten auch Fahrzeug- und Positionsdaten zur Analyse objektiver Variablen aufgezeichnet. Die Ermittlung der relevanten abhängigen Variablen aus den aufgezeichneten Rohsignalen erfolgte teilautomatisiert über Matlab-Skripte. Zum besseren Verständnis der später folgenden Auswertung sollen hier zunächst die abhängigen Variablen vorgestellt werden, die bei einer Ausweichsituation ausgewertet wurden. Dazu ist in Abbildung 67 schematisch ein Ausweichvorgang dargestellt und in Phasen unterteilt.

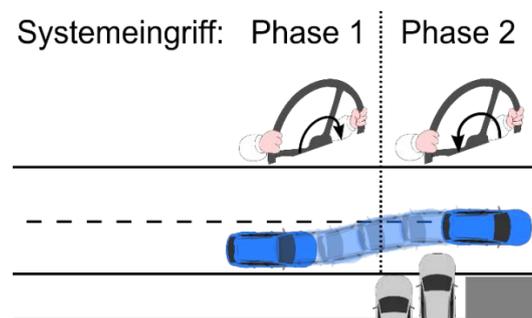


Abbildung 67: Phasen eines Ausweichmanövers bei Systemeingriff

Während der ersten Phase lenkt das Ausweichassistenzsystem vom Hindernis weg. Der Fahrer spürt ein Lenkmoment nach links, also gegen den Uhrzeigersinn. Lässt der Fahrer eine Lenkbewegung zu, wird das System bei den Assistenzvarianten "Führung" bzw. "Führung mit Ton" versuchen, das Fahrzeug in Phase 2 wieder in die ursprüngliche Fahrtrichtung zu drehen. Der Fahrer spürt dabei ein Lenkmoment im Uhrzeigersinn, also nach rechts. Bei der Assistenzform "Ausweichempfehlung" endet der Systemeingriff bereits nach einem Lenkimpuls vom Hindernis weg in Phase 1, der ebenfalls gegen den Uhrzeigersinn zu spüren ist. Der Fahrer muss, wenn nötig, in Phase 2 selbst wieder die Fahrtrichtung korrigieren. Die Fahrereingaben am Lenkrad wurden in Form des Handlenkmomentes und des Lenkradwinkels gemessen, die als Signale am Flexray abgegriffen wurden. Wie in Abbildung 68 dargestellt, werden Fahrereingaben am Lenkrad entgegen dem Uhrzeigersinn mit positivem, im Uhrzeigersinn mit negativem Vorzeichen versehen. Gierrate und Querbewegung die, als resultierende Größen der Lenkradeingaben auf die Fahrzeugbewegung durch die Inertialmesseinheit iTrace F400 gemessen wurden, sind bei einer Fahrzeugbewegung in Fahrtrichtung links (vgl. Abbildung 68, Phase 1) mit positivem Vorzeichen definiert, bei Fahrzeugbewegungen in Fahrtrichtung nach rechts mit negativem.

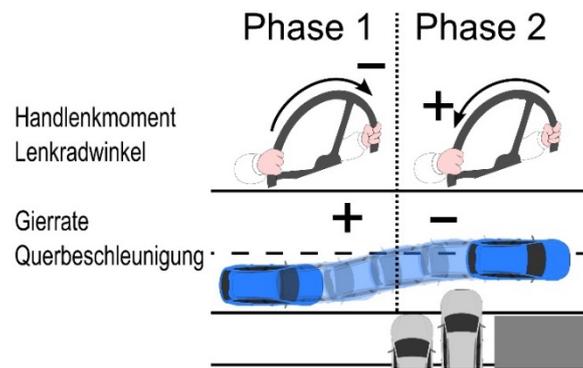


Abbildung 68: Vorzeichen der abhängigen Variablen bei einem Ausweichmanöver

Bei den meisten Ausweichsituationen mit Assistenzsystem kam der Eingriff früher als eine mögliche Fahrerreaktion, weshalb zum besseren Vergleich mit der Gruppe ohne Assistenz die "Fahrzeugreaktion" als abhängige Variable definiert wurde. Eine Fahrzeugreaktion wird als Abweichung von einer konstanten Geradeausfahrt mit 50 km/h angesehen und bei der Betätigung der Betriebsbremse oder einer Gierrate über dem Betrag von $1^\circ/\text{s}$ detektiert. Die Variablen Querversatz und minimaler Abstand zum Hindernis wurden analog zu Testfall 1 bestimmt.

In zahlreichen Kontrollierbarkeitsuntersuchungen wurden in der Vergangenheit starke Abweichungen im Fahrerverhalten zwischen Erst- und Zweitkontakt mit einem FAS beobachtet (vgl. z.B. Kobiela 2011; Färber 2015). Durch die Verwendung einer Coverstory sollte dem entgegengewirkt werden. Um zu prüfen, ob das gelungen ist, wurden vor der weiteren Analyse die Mittelwerte und Standardabweichungen der abhängigen Variablen verglichen und mit Signifikanztests analysiert. Die Ergebnisse sind im Anhang C in Tabelle 36 und Tabelle 37 zu finden. Bei allen objektiven Variablen sind keine signifikanten Unterschiede zwischen Erst- und Zweitkontakt vorhanden. Lediglich die subjektive Einschätzung der Kritikalität der Fahrsituation anhand der SBFV war im Realfahrzeug zwischen Erst- und Zweitkontakt signifikant unterschiedlich, wobei das Rating beim Erstkontakt kritischer ausfiel. Als Konsequenz dessen werden Erst- und Zweitkontakt bei der weiteren Auswertung der objektiven Variablen nicht separat betrachtet. Die subjektiven Ratings des Zweitkontaktes werden jedoch für weitere Betrachtungen ausgeschlossen.

Analyse der Faktoren

Da dem Versuch ein Mixed-Subjects-Versuchsplan zu Grunde lag, muss zunächst bei jeder abhängigen Variable bestimmt werden, ob die Faktoren "Prüfumgebung", "Gegenfahrstreifen" und "Assistenz" einen signifikanten Haupteffekt bzw. Interaktionseffekte

aufweisen. Dies geschieht durch Berechnung einer drei-faktoriellen Varianzanalyse (vgl. Bortz und Schuster 2010, S. 265-268). Ist ein signifikanter Haupteffekt zu finden (akzeptiertes Signifikanzniveau: $\alpha = .05$), soll über Post-hoc-Tests beim Faktor "Assistenz" genauer bestimmt werden, zwischen welchen Assistenzvarianten die Unterschiede liegen. Dafür wird das akzeptierte Signifikanzniveau über eine Bonferroni-Korrektur gemäß Bortz und Schuster (2010, S. 232) angepasst ($\alpha = .014$). Zusätzlich werden Effektgrößen nach Field (2013, S. 472) für Varianzanalysen und Pearson's r für Post-hoc-Tests berechnet (Field 2013, S. 532), wo Effektgrößen von $r < .3$ als klein, über $.5$ als groß und dazwischen als mittel gelten (Field 2013, S. 82). Zur Diskussion und Interpretation der Ergebnisse eignen sich Boxplots, die entsprechend der Faktoren im Anschluss dargestellt werden. Zusammenhänge im Fahrerverhalten zwischen VIL und Realfahrzeug wurden bei der Ermittlung der KON-Parameter in Kapitel 4.1.2 statistisch über die Berechnung von Korrelationen belegt. Dieser Ansatz wird auch hier aufgegriffen. Für intervallskalierte Daten wird der Korrelationskoeffizient nach Pearson, für ordinalskalierte Daten wie der subjektiven Bewertung anhand der SBFV die Korrelation nach Spearman berechnet. Die Ergebnisse sind in Anhang C, Tabelle 40 aufgeführt. Werte, die eine z-Transformation von ± 3.29 über-/unterschreiten wurden gemäß Field (2013, S. 32) als Ausreißer gewertet und für die Auswertung nicht in Betracht gezogen.

Die Ergebnisse der Varianzanalyse sind im Anhang C in Tabelle 38 aufgeführt. Signifikante Interaktionseffekte zwischen den einzelnen Hauptfaktoren gab es keine, mit einer Ausnahme. Zwischen den Faktoren „Prüfumgebung“ und „Assistenz“ wurde bei der Variable „maximale Verzögerung“ ein signifikanter Interaktionseffekt ($F(3,40) = 5.856, p = .002, r = .357$) festgestellt. Bei näherer Betrachtung fällt auf, dass bei der Kontrollgruppe ohne Assistenzsystem im VIL stärker gebremst wurde als im Realfahrzeug. Diese Beobachtung wird im weiteren Verlauf berücksichtigt. Mit Ausnahme dieser Interaktion wird für die erhobenen Daten angenommen, dass die Faktoren sich nicht gegenseitig beeinflussen. Deshalb werden sie im Folgenden getrennt voneinander analysiert.

Assistenz

Gemäß Untersuchungsziel soll Testfall 2 möglichst funktionsübergreifende Aussagen zur Kontrollierbarkeit und Methodik von Ausweichassistenzen liefern. Deshalb kamen in der Studie mehrere Assistenzfunktionen zum Einsatz, die bereits in Abbildung 65 vorgestellt

wurden. Die verschiedenen Funktionen erforderten unterschiedliche Interaktionen zwischen Fahrer und System. In Abbildung 69 und Abbildung 70 sind dafür aussagekräftige Einzelbeispiele geplottet, die repräsentativ für die mehrheitliche Fahrer-System-Interaktion stehen. In Abbildung 69 wird zunächst der Verlauf von Lenkradwinkel und Handlenkmoment sowie die daraus resultierende Gierrate für die Assistenzform "Ausweichempfehlung" dargestellt.

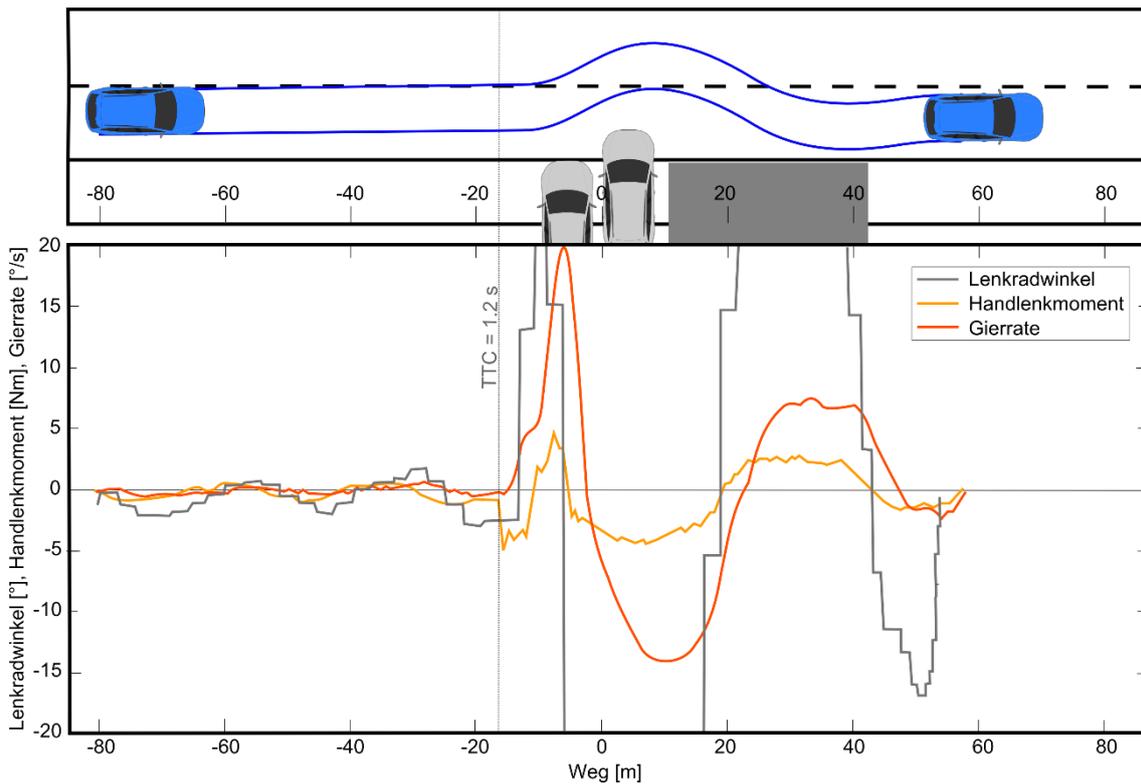


Abbildung 69: Interaktion Fahrer - System "Ausweichempfehlung"

Bei einer TTC von 1.2 s, die durch eine vertikale, gepunktete Linie in Abbildung 69 eingezeichnet ist, greift die Assistenzfunktion ein. Bedingt durch die Trägheit von Lenkrad und Fahrer fällt das Handlenkmoment zunächst steil ab. Nach einer personenspezifischen Zeitspanne von ca. 300 - 600 ms (entspricht bei 50 km/h ca. 4-8 m) greift der Fahrer den Lenkimpuls auf und beginnt seinerseits mit einer Lenkbewegung nach links vom Hindernis weg. Das Lenkmoment steigt an, bis es zum Beginn des Rücklenkvorganges wieder abfällt. An der Gierrate ist zu erkennen, dass - trotz der dem Moment des EPS-Motors entgegenwirkenden Trägheit von Fahrer und Lenkrad zu Beginn des Eingriffs - eine Bewegung nach links erzeugt wird, die mit einem Gierratenanstieg bis 5 °/s verbunden ist. Sobald der Fahrer aktiv mitlenkt, steigen Gierrate und Lenkradwinkel nach einem kleinen Plateau schnell an. Das führt zu einem deutlichen Querversatz und einer sehr großen Än-

derung des Headings. Ab dem Hochpunkt der Gierrate leitet der Fahrer die Rücklenkbewegung ein. Diese verläuft sehr unrund, zunächst mit einem steilen Abfall der Gierrate, dann mit einem lang anhaltenden bauchigen Verlauf nach dem Hindernis. Dies wiederum führt zu einem Überschwingen der Trajektorie, wodurch der Fahrer eine Strecke bis ca. 50 m nach dem Hindernis benötigt, um das Fahrzeug wieder in Fahrtrichtung auszurichten.

Bei der Assistenzform "Führung" ist, wie in Abbildung 70 zu sehen, auf den ersten Blick ein ähnliches Lenkverhalten wie bei der Interaktion mit dem einseitigen Lenkmoment in Abbildung 69 festzustellen.

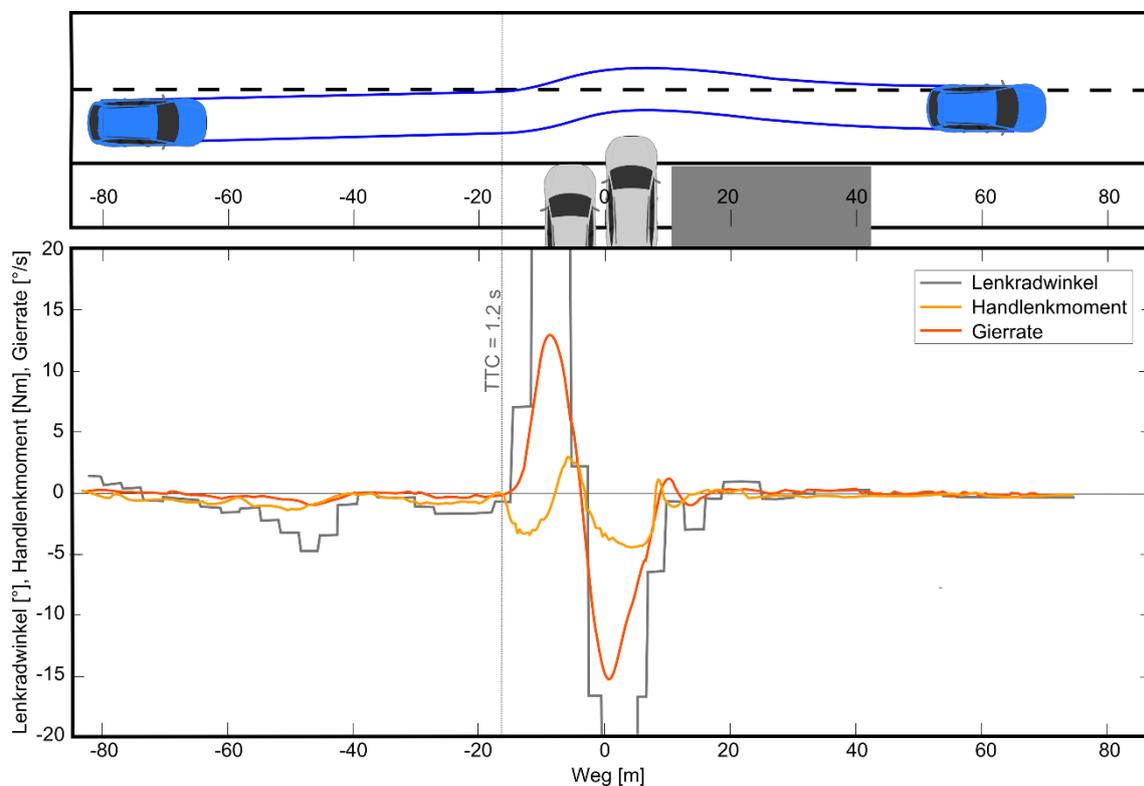


Abbildung 70: Interaktion Fahrer - System "Führung"

Im ausgewählten Beispiel wird aber auch deutlich, dass das Handlenkmoment bei Beginn der Auslösung nicht sprunghaft abfällt, sondern, bedingt durch den verwendeten Regler, etwas sanfter. Nach ungefähr derselben Zeitspanne wie bei der Assistenzform "Ausweichempfehlung", in der Trägheit von Lenkrad und Fahrer dem Systemeingriff entgegen wirken, ist ein Anstieg im Handlenkmoment zu verzeichnen. Durch den adaptiven Echtzeitregler resultiert das verzögerte Mitlenken des Fahrers nicht in einem Plateau bei der Gierrate wie im Beispiel zuvor. Der Anstieg verläuft hingegen fast linear. Der Zeitpunkt für den Beginn des Rücklenkvorganges wird in diesem Fall vom System eingeleitet und

in der Intensität geregelt. Der Fahrer folgt im Beispiel den Systemvorgaben, so dass schon kurz nach dem Hindernis das Fahrzeug ohne Überschwingen der Trajektorie wieder in die gewünschte Fahrtrichtung zeigt. Bei der Assistenz-Variante "Führung mit Ton" zeigen sich keine wesentlichen Unterschiede in der Fahrer-System-Interaktion zur Funktion "Führung", weshalb hier auf eine separate Darstellung verzichtet wird.

Zum Vergleich ist in Abbildung 71 die Lenkbewegung einer typischen Fahrerreaktion ohne Systemeingriff dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Fahrer deutlich später als bei einer TTC von 1.2 s mit dem Ausweichmanöver beginnt. Lenkradwinkel, Handlenkmoment und Gierrate gehen hier immer in dieselbe Richtung, da der EPS-Motor nicht interveniert und so nur die Fahrereingaben am Lenkstrang umgesetzt werden. Beim manuellen Ausweichen benötigt der Fahrer im Beispiel bis ca. 50 m nach dem Hindernis, um das Fahrzeug wieder in die ursprüngliche Fahrtrichtung zu stabilisieren.

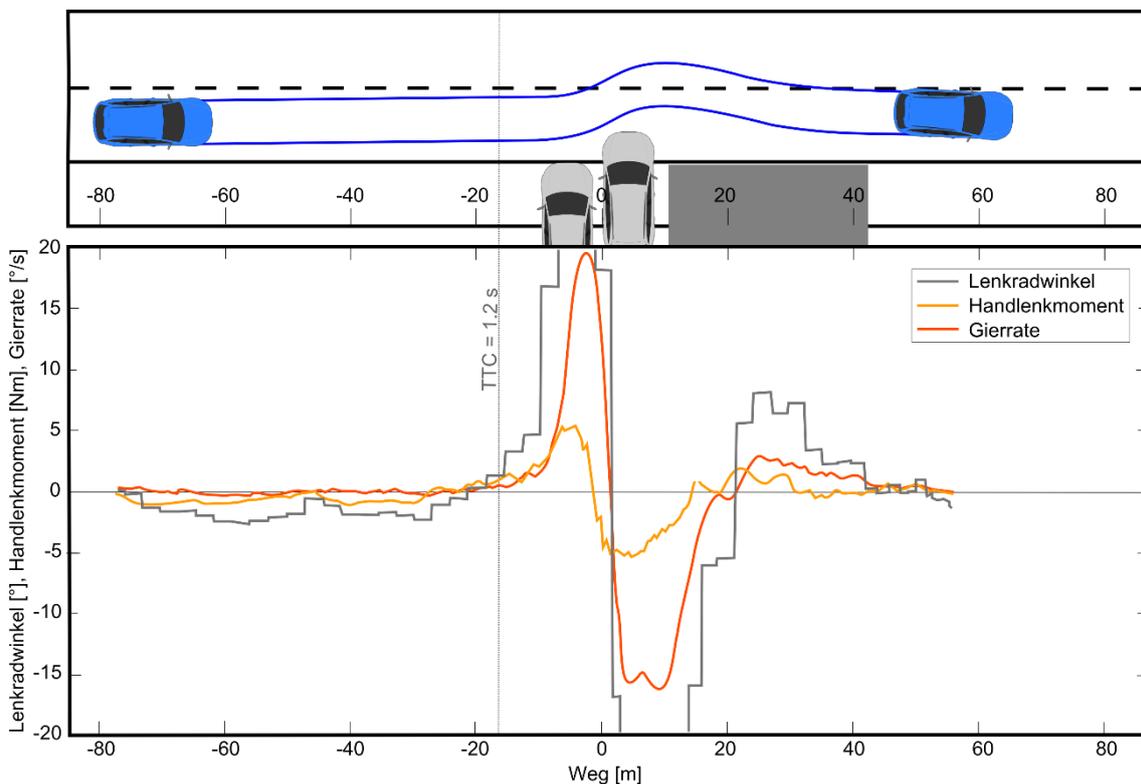


Abbildung 71: Fahrer ohne System

Um die in den Signalverläufen gefundenen Unterschiede der Systemausprägungen auch mit objektiven Kennwerten zu untermauern, werden zur weiteren Auswertung die zuvor beschriebenen abhängigen Variablen näher betrachtet. Die Ergebnisse der statistischen Tests sind im Anhang C ab Seite 222 tabellarisch aufgeführt.

In der Vergleichsgruppe ohne Assistenz benötigten Fahrer im Mittel ca. 0.7 s, um eine Gegenmaßnahme auf das ausparkende Hindernis einzuleiten. Wie in Abbildung 72 links zu erkennen, ermöglichen die Assistenzsysteme eine deutlich frühere Fahrzeugreaktion, die bei ca. 1.0 s liegt.

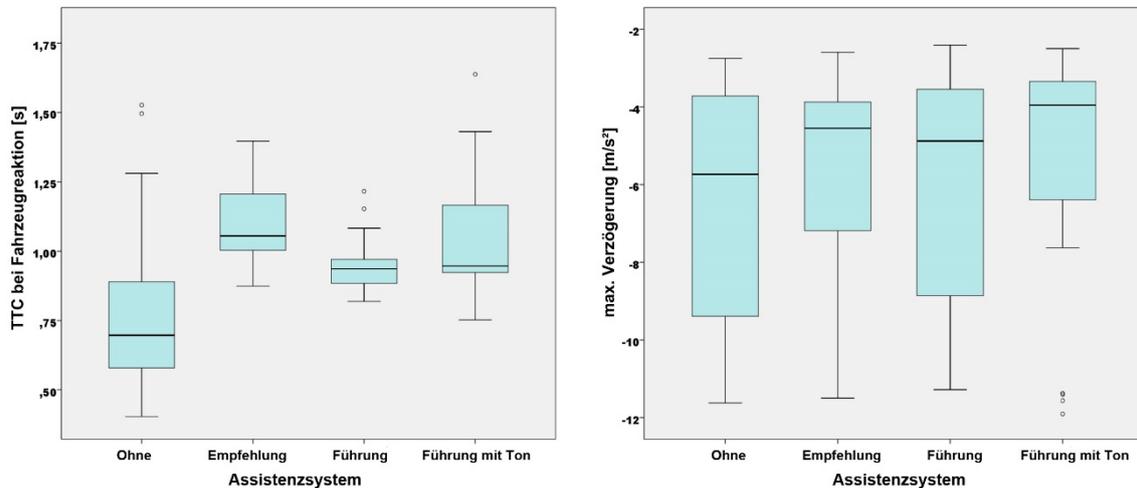


Abbildung 72: Assistenz - TTC bei Fahrzeugreaktion (links, $n = 96$) und maximale Verzögerung (rechts, $n = 96$)

T-Tests bestätigen einen signifikanten Unterschied zwischen allen Assistenzvarianten und der Vergleichsgruppe ohne Assistenzfunktion (vgl. Anhang C, Tabelle 39). Wie in der Definition auf Seite 118 bereits erläutert, wird der Beginn einer Fahrzeugreaktion bei Gierraten über dem Betrag von $1 \text{ }^\circ/\text{s}$ oder bei der Betätigung der Betriebsbremse definiert. In Abbildung 72 wird auf der rechten Seite deutlich, dass alle Fahrer die Bremse betätigten. Es wurden im Mittel Verzögerungen von ca. 5 m/s^2 , in Einzelfällen aber auch Vollbremsungen über 10 m/s^2 verzeichnet. Die große Streuung bei allen Gruppen deutet auf unterschiedliche Verhaltensmuster hin, wie bereits bei der Ermittlung der KON-Parameter für Querverkehrssituationen festgestellt wurde. Ohne Assistenzsystem traten im Mittel die größten Verzögerungen auf, wobei sich alle Gruppen nicht signifikant voneinander unterscheiden.

Bei mittiger Ausgangslage im Fahrstreifen musste für eine erfolgreiche Kollisionsvermeidung mindestens ein Querversatz von 0.25 m hergestellt werden. Bei keiner Querverkehrssituation wurde eine Kollision mit dem ausparkenden Hindernis verzeichnet, was in Abbildung 73 am rechten Boxplot nachvollzogen werden kann. Der minimale Abstand zum Hindernis betrug fast immer mehr als 0.5 m , wobei auch hier kein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen vorliegt. Im Mittel wurde ein Querversatz von ca. 0.7 m

registriert. Bei der Ausweichempfehlung und der Gruppe ohne Assistenz ist beim Querversatz eine starke Streuung zu sehen, was darauf hindeutet, dass wenige Fahrer extremere Querversätze herstellten als beim System Führung (mit Ton).

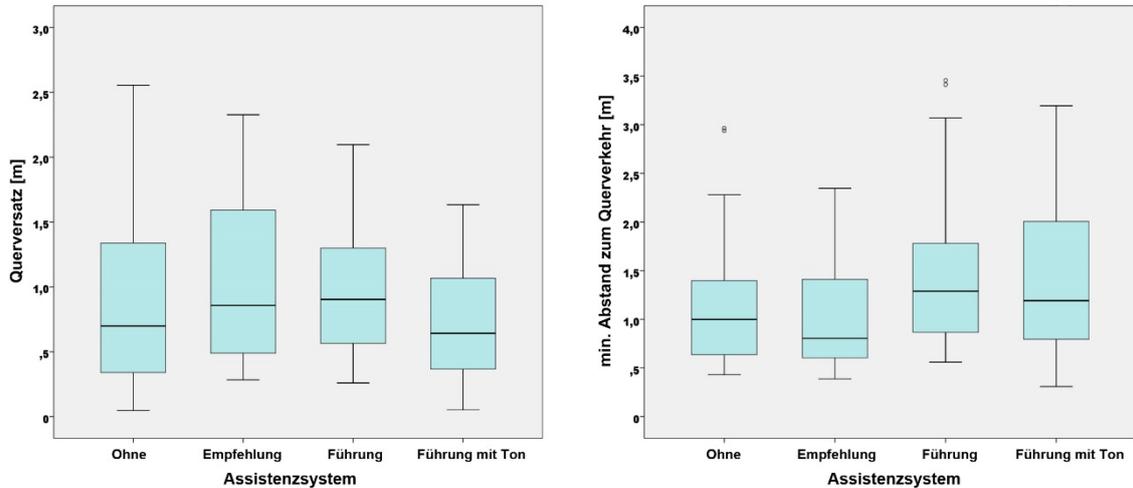


Abbildung 73: Assistenz - Querversatz (links, $n = 96$) und minimaler Abstand zum Querverkehr (rechts, $n = 96$)

Die Darstellung der Extremwerte des Handlenkmomentes in Abbildung 74 muss für vergleichende Aussagen mit Vorsicht betrachtet werden. Die verzeichneten minimalen Handlenkmomente traten bei den Gruppen mit Assistenzfunktion in der Auslenkphase auf, da hier das volle Lenkmoment des EPS-Motors zunächst gegen die Trägheit des Fahrers bzw. Lenkrades arbeitete (vgl. Abbildung 69 und Abbildung 70). Bei der Gruppe ohne Assistenz wurde hingegen das minimale Handlenkmoment in der Rücklenkphase erreicht (vgl. Abbildung 71).

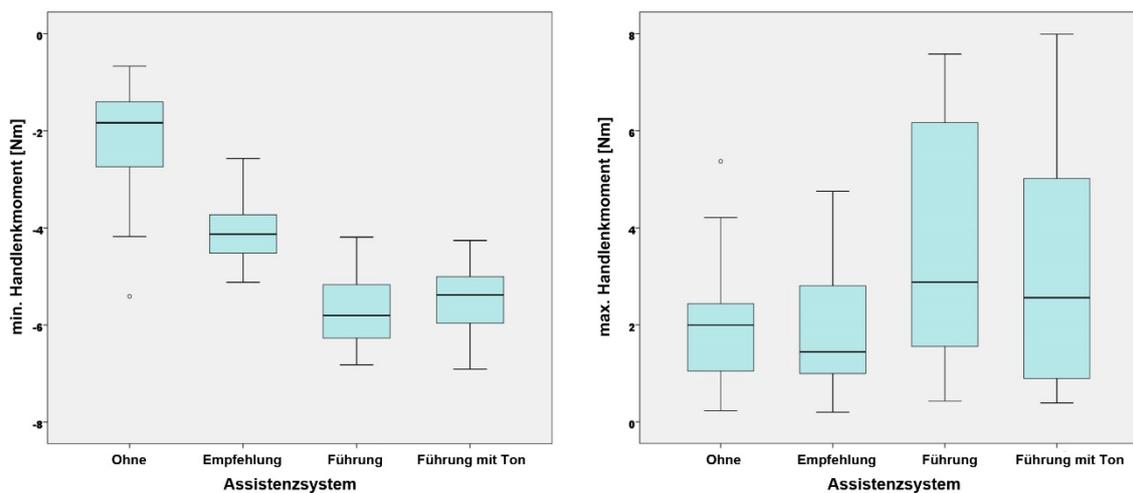


Abbildung 74: Assistenz - minimales und maximales Handlenkmoment ($n = 96$)

Hier wurden deutliche Unterschiede zwischen den Gruppen gemessen, mit Ausnahme der Varianten "Führung" und "Führung mit Ton", wobei diese auch bis auf den Warnton identisch waren. Das wird durch signifikante Unterschiede zwischen den Assistenzen "Führung (mit Ton)" und den anderen Gruppen in berechneten t-Tests belegt (vgl. Anhang C, Tabelle 39). Die maximalen Handlenkmomente der Assistenz "Führung (mit Ton)" wurden, genau umgekehrt zu den minimalen, in der Rücklenkphase gemessen, wo die großen Streuungen auffallen. Diese kommen dadurch zu Stande, dass manche Fahrer den Systemeingriff auch in dieser Phase dämpften und somit gegen den Lenkmotor arbeiteten, andere dem System folgten und dadurch ein geringeres Handlenkmoment beobachtet wurde. Signifikante Unterschiede traten hier nur zwischen der Gruppe "Führung" und "Ausweichempfehlung" auf (vgl. Anhang C, Tabelle 39).

Aus den Interaktionen der Fahrer mit den Assistenzsystemen entstehen als abhängige Variablen die Querb beschleunigung und die Gierrate des Fahrzeuges. Ohne Assistenz werden diese Größen lediglich durch die Fahrereingaben am Lenkrad bewirkt. Die Extrema der Gierrate werden entsprechend ihrer Vorzeichendefinition in Abbildung 68 dargestellt und belaufen sich im Mittel auf ± 5 %/s. Zwischen den betrachteten Gruppen sind nur marginale Unterschiede zu erkennen, wobei ohne System tendenziell die geringsten Gierraten gemessen wurden (siehe Abbildung 75).

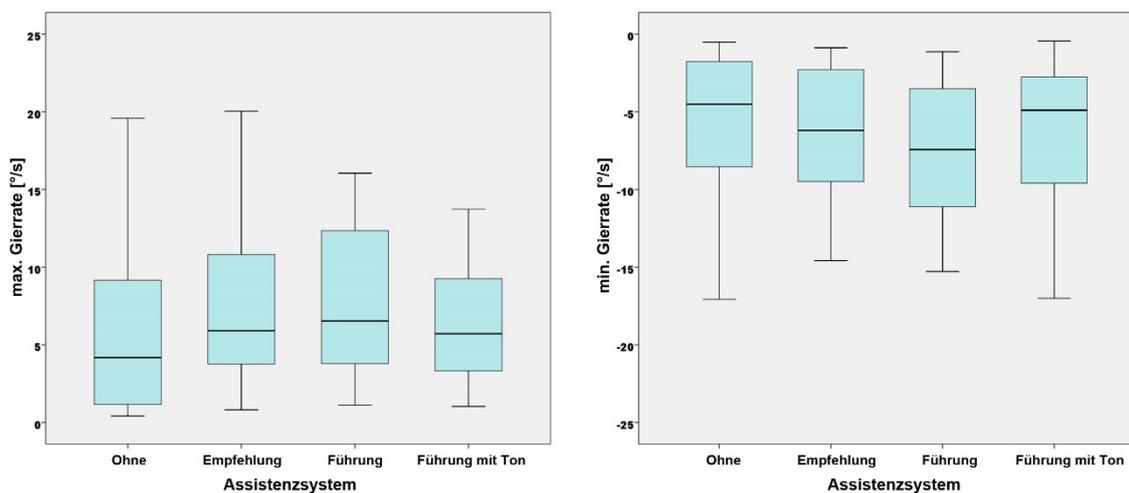


Abbildung 75: Assistenz - maximale und minimale Gierrate ($n = 96$)

Die aufgetretenen Querb beschleunigungen sind ebenfalls bei der Gruppe ohne System in ihrer maximalen Intensität am geringsten. Auch hier bestehen aber keine signifikanten Unterschiede, was durch den visuellen Eindruck in Abbildung 76 bestätigt wird. Alle Manöver fanden weit unterhalb der fahrdynamischen Grenzen statt, wodurch kein ESP-Eingriff verzeichnet wurde.

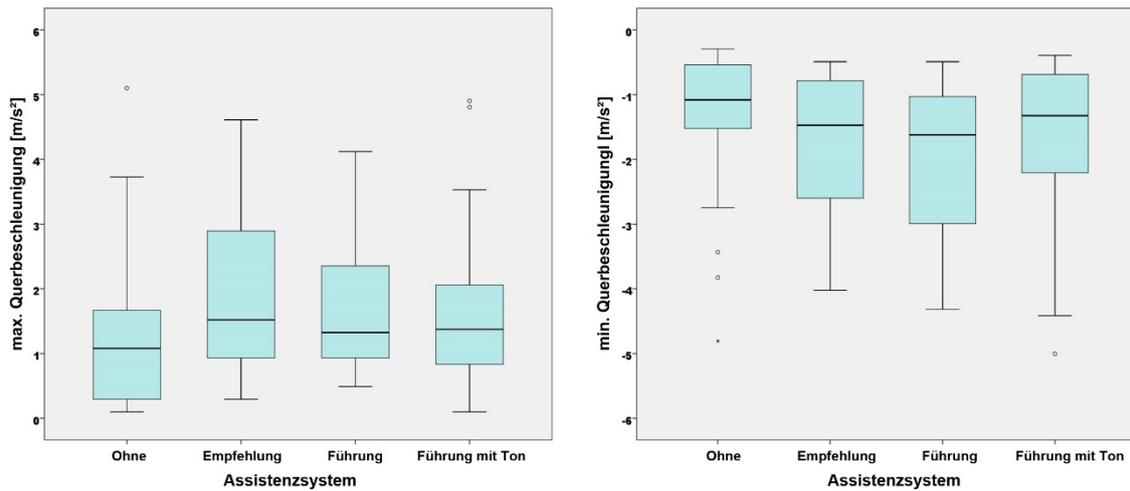


Abbildung 76: Assistenz - maximale und minimale Querbeschleunigung ($n = 96$)

Nach jeder Ausweichsituation wurden die Probanden nach ihrer subjektiven Einstufung anhand der SBFV-Skala gefragt. Hier wurden, wie bereits erwähnt, nur Erstkontakte zur Bewertung herangezogen. Dabei zeigt sich, dass die Fahrer mit System-Unterstützung die Situation weniger kritisch wahrnahmen als die Gruppe ohne System. Durch den Warnton empfanden die Fahrer die Situation trotz identischem Systemeingriff als gefährlicher. Bei den Assistenzformen "Ausweichempfehlung" und Führung waren jeweils vier Urteile im Bereich gefährlich (33%), bei "Führung mit Ton" sechs (50%) und ohne System acht (66%). Einen signifikanten Unterschied zeigte ein Kruskal-Wallis-Test allerdings nicht (vgl. Anhang C, Tabelle 38).

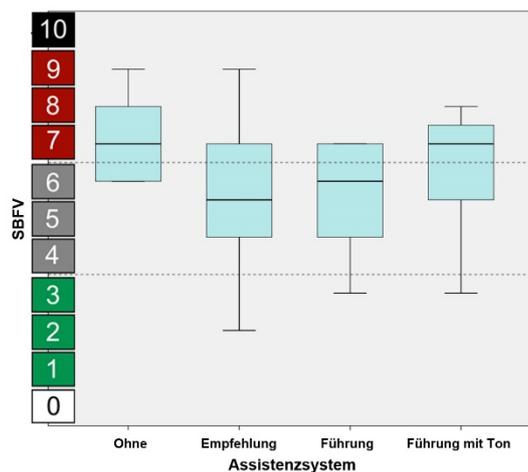


Abbildung 77: Assistenz - SBFV-Urteil ($n = 48$)

Gegenfahrstreifen

Ein zentraler Aspekt für die Kontrollierbarkeitsbewertung von Ausweichassistenzsystemen ist die Absicherung einer möglichen Kollision mit dem Gegenverkehr. Wie bereits in 5.3.1 begründet, wird hier ein abstrakter Ansatz gewählt, der zunächst eine Belegung des Gegenfahrstreifens mit einem statischen Hindernis vorsieht. In Abbildung 78 ist die typische Interaktion zwischen Fahrer und dem System "Ausweichempfehlung" bei einer Ausweichsituation mit belegtem Gegenfahrstreifen dargestellt.

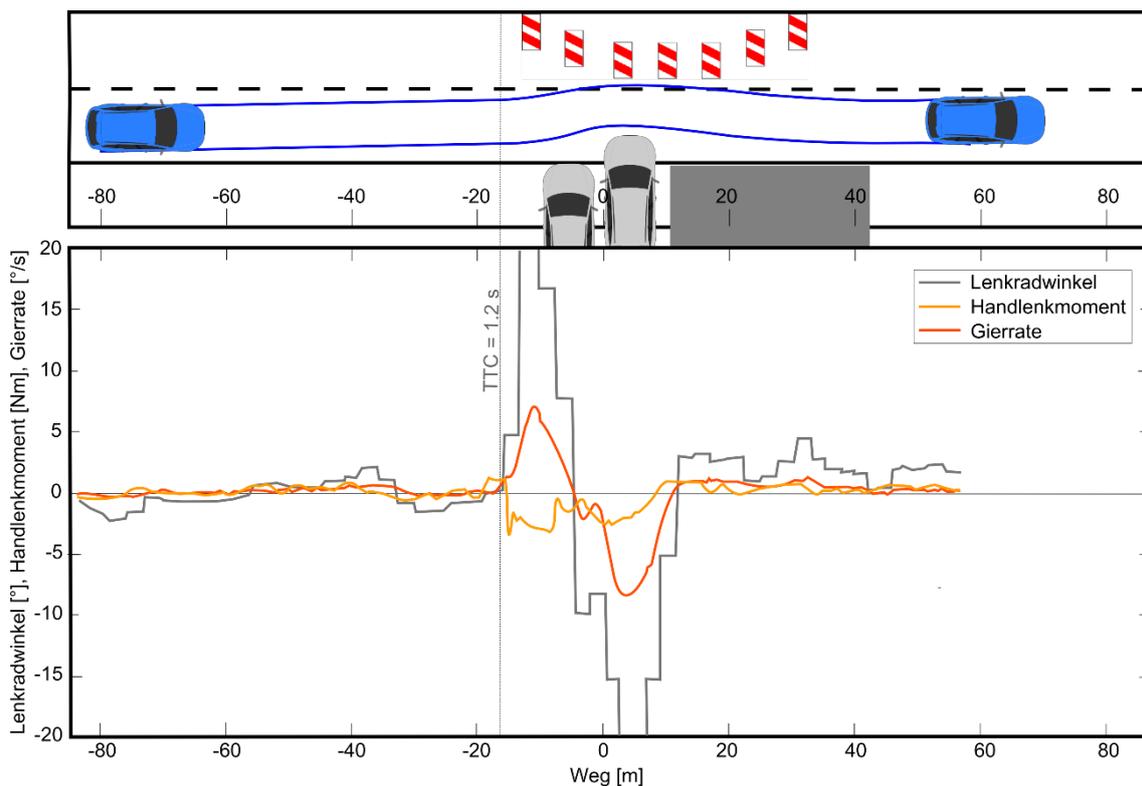


Abbildung 78: Interaktion Fahrer - System "Ausweichempfehlung" bei belegtem Gegenfahrstreifen

Wie in Abbildung 69 mit freiem Gegenfahrstreifen, fällt das Handlenkmoment kurz nach dem Eingriff bei einer TTC von 1.2 s sprunghaft ab. Im Gegensatz dazu wirken die Trägheit von Fahrer und Lenkrad nicht nur 300 ms dem Systemeingriff entgegen, sondern der Fahrer arbeitete die vollen 600 ms der Eingriffsdauer gegen das System, was am negativen Verlauf des Handlenkmomentes deutlich wird. Zu Beginn des Eingriffs überragt das Systemmoment das entgegenwirkende Moment am Lenkrad, weshalb eine Gierrate bis zu 6 °/s aufgebaut wird. Ab diesem Zeitpunkt übersteigt das Handlenkmoment das anliegende Moment des EPS-Motors, weshalb die Gierrate wieder abgebaut wird. Der darauf folgende sprunghafte Anstieg des Handlenkmoments zeigt das Ende des Systemeingriffs. Der Fahrer benötigte eine kurze Zeitspanne, um diesen Abfall in seinem Regelverhalten

zu berücksichtigen, was in einem leichten Schwingen des Handlenkmomentes und der Gierrate kurz vor dem Hindernis resultierte. Im Anschluss lenkte er das Fahrzeug wieder in Fahrtrichtung zurück, was ca. 15 m nach dem Hindernis zum Abschluss kam.

In Abbildung 79 ist die Interaktion eines Fahrers mit der Funktion der Systeme "Führung"/"Führung mit Ton" bei belegtem Gegenfahrstreifen abgebildet. Analog zu Abbildung 70 bei freiem Gegenfahrstreifen, fällt auch hier das Handlenkmoment zu Beginn des Eingriffs rampenförmig ab. Das genügt, um in der Anfangsphase eine Gierrate von bis zu 7 °/s aufzubauen. Das Handlenkmoment bleibt aber in der gesamten Auslenkphase konstant bei ca. -6 Nm. Das bedeutet, der Fahrer arbeitete gegen das volle Moment des EPS-Motors an und dämpfte den Eingriff fast vollständig ab. Da durch dieses Verhalten nur geringe Änderungen im Heading erzeugt wurden, benötigte der Regler auch nur noch eine geringere Intensität, um das Fahrzeug wieder gerade zu stellen, was durch den kleinen Peak nach dem Anstieg des Handlenkmomentes im Anschluss an die Auslenkphase erreicht wird. Die ursprüngliche Fahrtrichtung wurde somit bereits auf Höhe des Hindernisses erreicht.

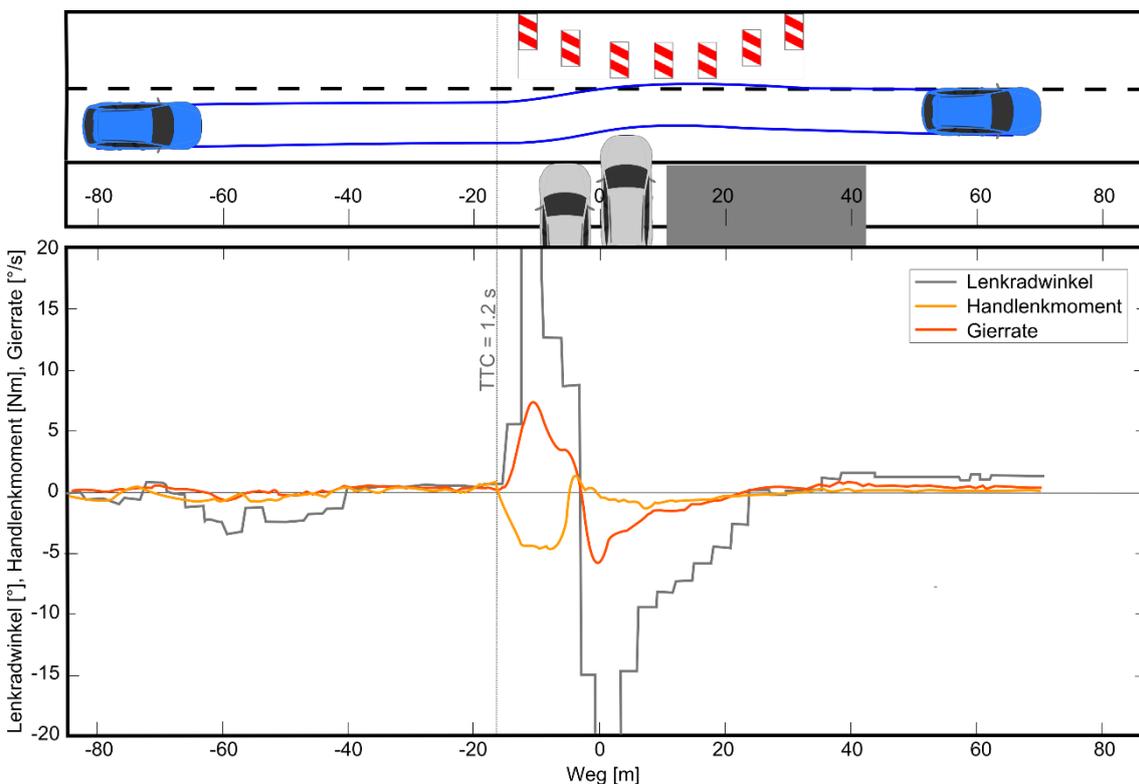


Abbildung 79: Interaktion Fahrer - System "Führung" bei belegtem Gegenfahrstreifen

Diese Interaktionen werden im weiteren Verlauf mit objektiven Kennwerten quantifiziert und zwischen den Gruppen mit belegtem und freiem Gegenfahrstreifen verglichen. Da

die Interaktionen systemabhängig sind, wird eine danach aufgeteilte Darstellungsform gewählt. Die Ergebnisse der statistischen Tests sind im Anhang C in Tabelle 38 aufgeführt.

In Abbildung 80 ist links zunächst die TTC bei Fahrzeugreaktion aufgeführt. Erwartungsgemäß bewirkte ein belegter Gegenfahrstreifen hier keine merklichen Unterschiede.

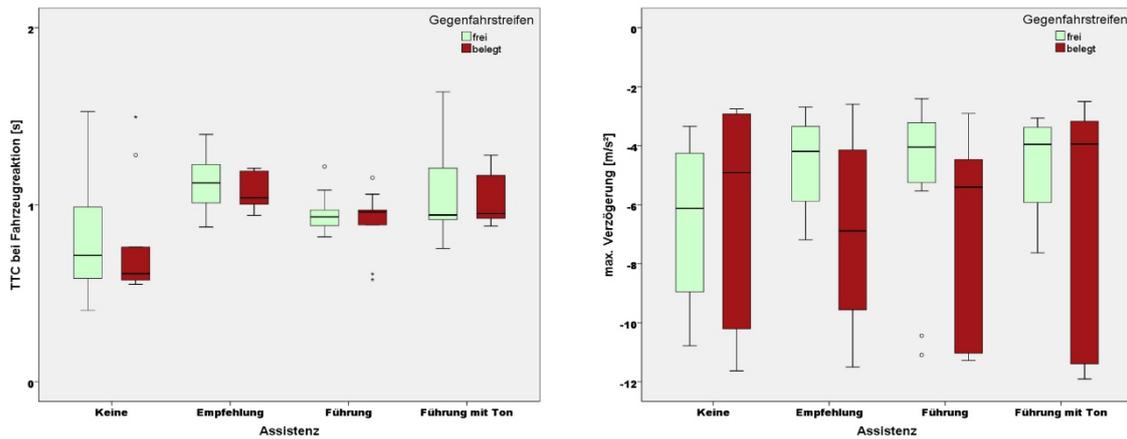


Abbildung 80: Gegenfahrstreifen - TTC bei Fahrzeugreaktion (links, $n = 96$) und maximale Verzögerung (rechts, $n = 96$)

Bei der maximalen Verzögerung (Abbildung 80, rechts) sind diesbezüglich auch keine signifikanten Unterschiede vorhanden (vgl. Anhang C, Tabelle 38). Es fällt allerdings auf, dass die Streuung bei belegtem Gegenfahrstreifen deutlich höher ist und wenige Fahrer Vollbremsungen mit hohen Verzögerungsraten durchführten, die bei freiem Gegenfahrstreifen kaum zu finden waren.

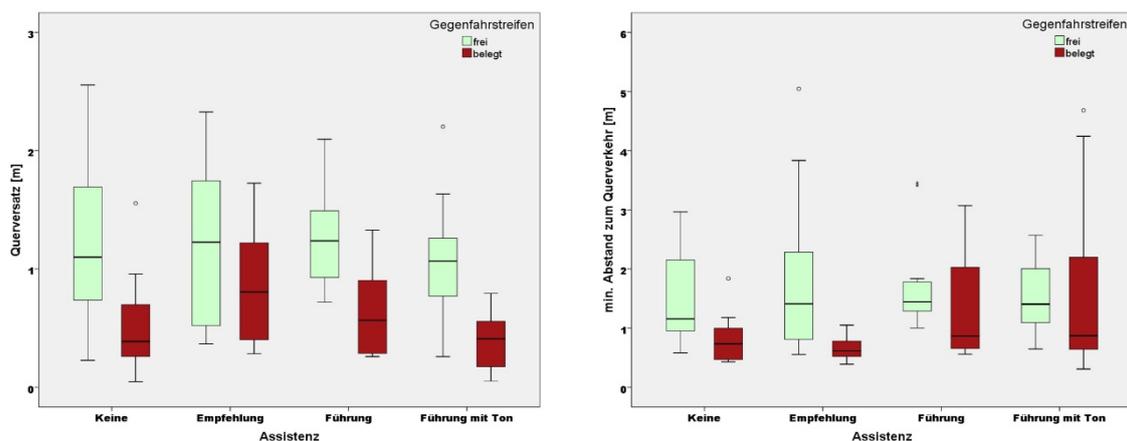


Abbildung 81: Gegenfahrstreifen - Querversatz (links, $n = 96$) und minimaler Abstand zum Querverkehr (rechts, $n = 96$)

Der von den Fahrern hergestellte bzw. zugelassene Querversatz, der in Abbildung 81 links dargestellt ist, unterscheidet sich deutlich zwischen den beiden Gruppen.

Bei freiem Gegenfahrstreifen wurde im Mittel ein halber Meter Querversatz mehr erzielt, vergleichend zur Gruppe mit belegtem. Die hinterlegte Funktion der Systeme "Führung" und "Führung mit Ton" zielte auf einen Querversatz von einem Meter ab, der durch die Fahrer auf ca. 0.5 m gedämpft wurde. Das schlägt sich auch beim minimalen Abstand zum querenden Hindernis nieder, der bei belegtem Gegenfahrstreifen in allen Assistenzvariationen niedriger ist (vgl. Abbildung 81, rechts). Dabei kollidierte kein Fahrer mit dem Querverkehr oder der Baustelle auf dem Gegenfahrstreifen. Bei den Systemen "Führung" und "Führung mit Ton" schafften es wenige Fahrer durch eine Vollbremsung vor dem Hindernis zum Stehen zu kommen, was die teils erhöhten minimalen Abstände und die Streuung erklärt. Bei beiden Variablen ergibt die Varianzanalyse signifikante Unterschiede beim Faktor Gegenfahrstreifen (vgl. Anhang C, Tabelle 38).

Zur näheren Analyse der gefundenen Unterschiede beim Querversatz werden in Abbildung 82 die Extremwerte des Handlenkmoments dargestellt.

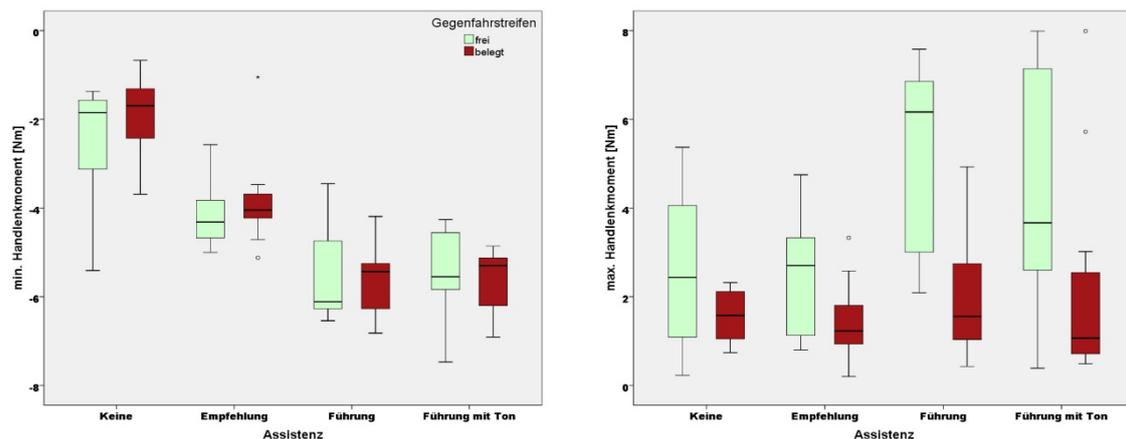


Abbildung 82: Gegenfahrstreifen - minimales und maximales Handlenkmoment ($n = 96$)

Das gemessene Handlenkmoment weist in der Auslenkphase keine signifikanten Unterschiede zwischen den betrachteten Gruppen auf (siehe auch Abbildung 82, links). Wie bereits bei der Analyse der unterschiedlichen Assistenzformen erläutert, ist dies auf die anfängliche, dem System entgegenwirkende Trägheit von Fahrer und Lenkrad zurückzuführen, die hier unabhängig von der Fahrsituation das Minimum ergibt. Beim Maximum (Abbildung 82, rechts) sind vor allem beim System "Führung (mit Ton)" deutliche Unterschiede zu erkennen, die sich auch als signifikant erweisen (vgl. Anhang C, Tabelle 38). Bedingt durch das fast vollständige Dämpfen der Auslenkphase durch die Fahrer musste der Regler in der Rücklenkphase nicht mit voller Intensität eingreifen, wodurch auch das Handlenkmoment bei belegtem Gegenfahrstreifen niedriger bleibt.

Das starke Dämpfen der Fahrer bzw. das geringere Auslenken ohne System resultiert in weniger dynamischen Fahrzeugreaktionen. Die Gierrate, deren Extrema in Abbildung 83 abgebildet sind, blieb bei belegtem Gegenfahrstreifen meist unter dem Betrag von 5 ‰, während sie bei freiem Gegenfahrstreifen fast doppelt so hoch war. Diese Unterschiede erweisen sich als signifikant.

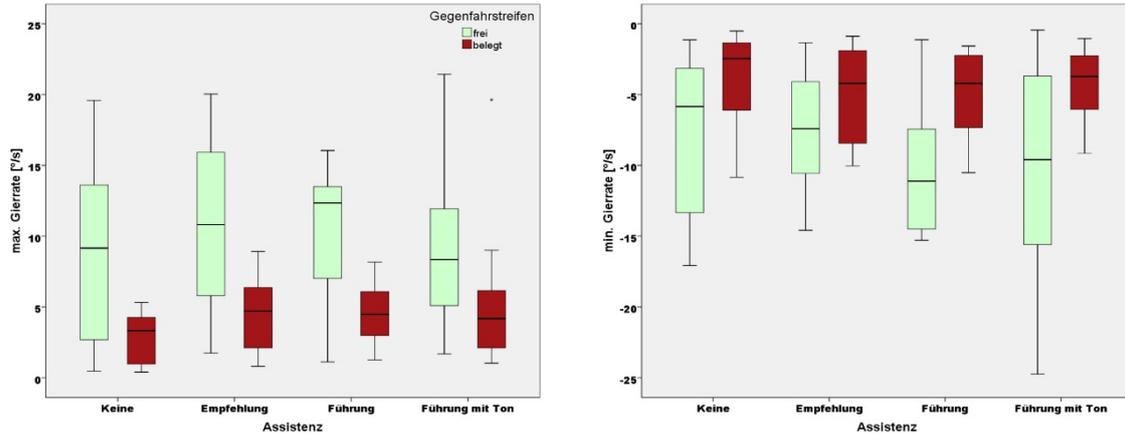


Abbildung 83: Gegenfahrstreifen - maximale und minimale Gierrate ($n = 96$)

Ähnliche Resultate wie bei der Gierrate lassen sich auch bei der Querschleunigung in Abbildung 84 beobachten. Bei freiem Gegenfahrstreifen erreichen die Extrema fast den doppelten Betrag und streuen deutlich stärker. Letzteres Phänomen wird wieder durch wenige Fahrer bedingt, die mit großer Querdynamik auswichen. Auch hier sind die gefundenen Unterschiede signifikant (vgl. Anhang C, Tabelle 38).

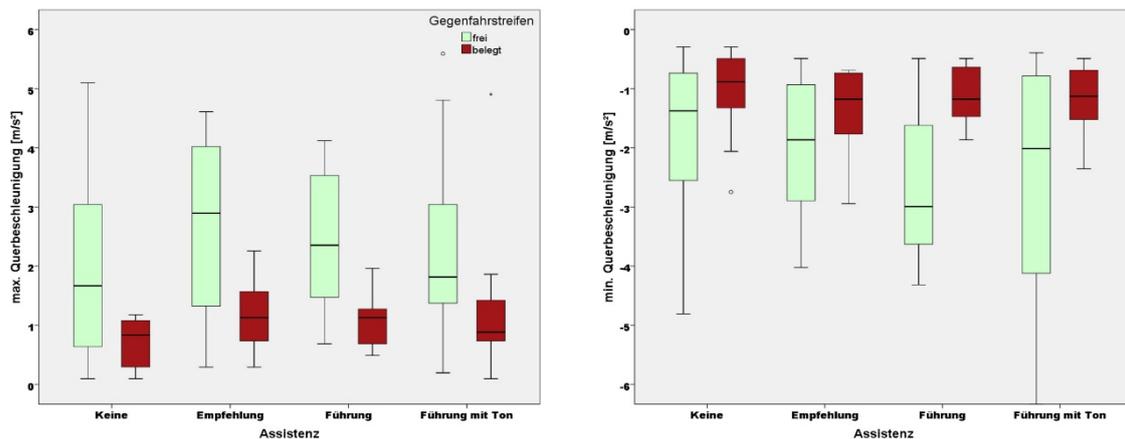


Abbildung 84: Gegenfahrstreifen - maximale und minimale Querschleunigung ($n = 96$)

Die subjektive Wahrnehmung der Kritikalität der Fahrsituation scheint von der Belegung des Gegenfahrstreifens nicht beeinflusst zu sein. Wie in Abbildung 85 zu sehen, reihen

sich die Urteile auf vergleichbarem Niveau ein. Der Mann-Whitney-U-Test ergibt ebenfalls keinen signifikanten Unterschied bezüglich des Faktors "Gegenfahrstreifen". Von insgesamt 22 Urteilen im Bereich "gefährlich" wurde genau die Hälfte bei belegtem, die anderen zwölf bei freiem Gegenfahrstreifen vergeben.

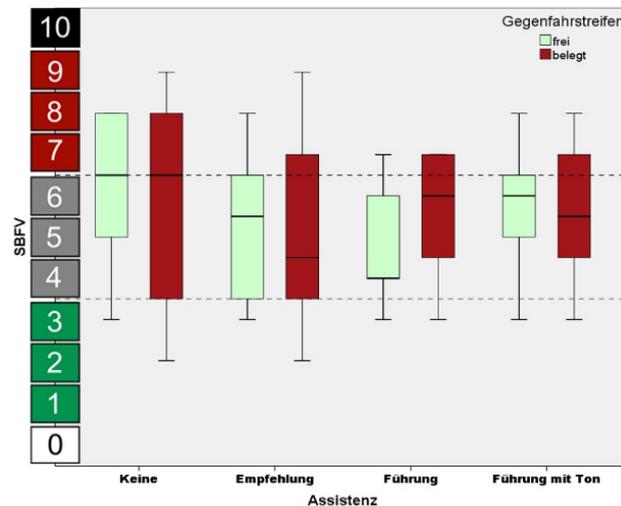


Abbildung 85: Gegenfahrstreifen - SBFV-Urteil ($n = 48$)

Prüfumgebung

Ein weiterer Aspekt der Studie lag auf der Eignungsuntersuchung der Prüfumgebung VIL für Kontrollierbarkeitsfragestellungen von Ausweichassistenzsystemen. Dazu wurden, wie bei den Faktoren zuvor, zunächst Signalverläufe der Fahrer-System-Interaktion in VIL und Realfahrzeug analysiert und verglichen. Dabei waren im Gegensatz zu den Faktoren "Assistenz" und "Gegenfahrstreifen" zunächst keine grundlegenden Unterschiede in den Interaktionsmustern zwischen FAS und Fahrer, bedingt durch die Prüfumgebungen, festzustellen. Die Vergleichsgruppe ohne Systemeingriff zeigte allerdings bekannte Abweichungen im Fahrerverhalten zwischen VIL und Realfahrzeug, die auch bei der Ermittlung der KON-Parameter aufgetreten waren. Bei dieser Gruppe erfolgte z.B. eine Fahrzeugreaktion im VIL durchschnittlich ca. 0.3 s später als im Realfahrzeug (vgl. Abbildung 86, links). Auch mit Systemeingriff war die Fahrzeugreaktion im VIL leicht verspätet, allerdings nicht so deutlich, so dass auch statistisch kein signifikanter Unterschied gefunden wurde (siehe Anhang C, Tabelle 38). Die deutlich spätere Reaktion ohne System verschiebt sich durch die zusätzlich verspätete Fahrerreaktion im VIL noch näher an das Hindernis zu einer TTC von nur noch ca. 0.6 s. Dadurch müssen die Fahrer im VIL

deutlich heftiger reagieren, um eine Kollision zu vermeiden, was sich z.B. bei der maximalen Verzögerung bestätigt und in Abbildung 86 rechts zu sehen ist.

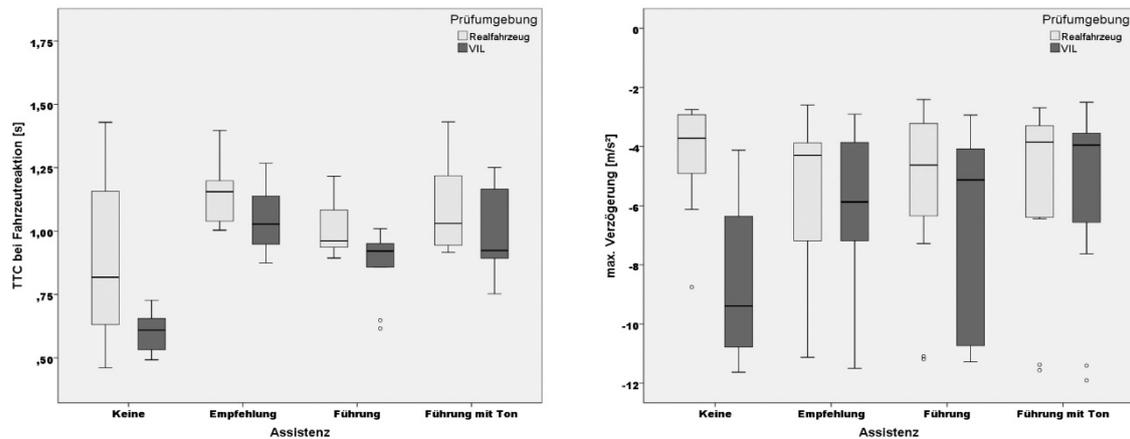


Abbildung 86: Prüfumgebung - TTC bei Fahrzeugreaktion (links, $n = 96$) und maximale Verzögerung (rechts, $n = 96$)

Der signifikante Haupteffekt des Faktors Prüfumgebung (vgl. Anhang C, Tabelle 40) ist daher vermutlich hauptsächlich auf das unterschiedliche Verhalten in den beiden Prüfumgebungen in der Bedingung ohne Systemeingriff zurückzuführen.

Der zu Beginn der Auswertung erwähnte Interaktionseffekt zwischen den Faktoren "Assistenz" und "Prüfumgebung" bei der abhängigen Variable "max. Verzögerung" wird durch diese Beobachtungen erklärt. Eine Fragestellung für Testfall 2 ist die Eignungsprüfung des VIL für Systeminteraktionen. Methodisch sollen mögliche Zusammenhänge zwischen Fahrerverhalten im VIL und Realfahrzeug, wie bei der Ermittlung der KON-Parameter, über Korrelationskoeffizienten überprüft werden. Als Konsequenz des Interaktionseffekts und weil für die Bewertung ein Systemeingriff zu Grunde liegen soll, wird die Gruppe ohne Assistenz für die Berechnung der Korrelationskoeffizienten (Anhang C, Tabelle 40) ausgeschlossen. Für die Variablen "TTC bei Fahrzeugreaktion" und "max. Verzögerung" werden auf diesem Weg signifikante Zusammenhänge zwischen den Prüfumgebungen VIL und Realfahrzeug nachgewiesen (Korrelationskoeffizienten nachzulesen in Anhang C, Tabelle 40).

In Abbildung 87 sind die Variablen "Querversatz" und "min. Abstand zum Querverfahrzeug" als Boxplot aufgetragen. Zwischen VIL und Realfahrzeug bestehen augenscheinlich keine größeren Unterschiede. Das wird durch die Ergebnisse der Varianzanalyse bestätigt, in der beim Faktor Prüfumgebung kein signifikanter Unterschied für diese Variablen

festgestellt wird (siehe Anhang C, Tabelle 38). Die Berechnung der Korrelationskoeffizienten weist signifikante Zusammenhänge zwischen den Prüfumgebungen nach und untermauert damit diesen Befund (vgl. Anhang C, Tabelle 40).

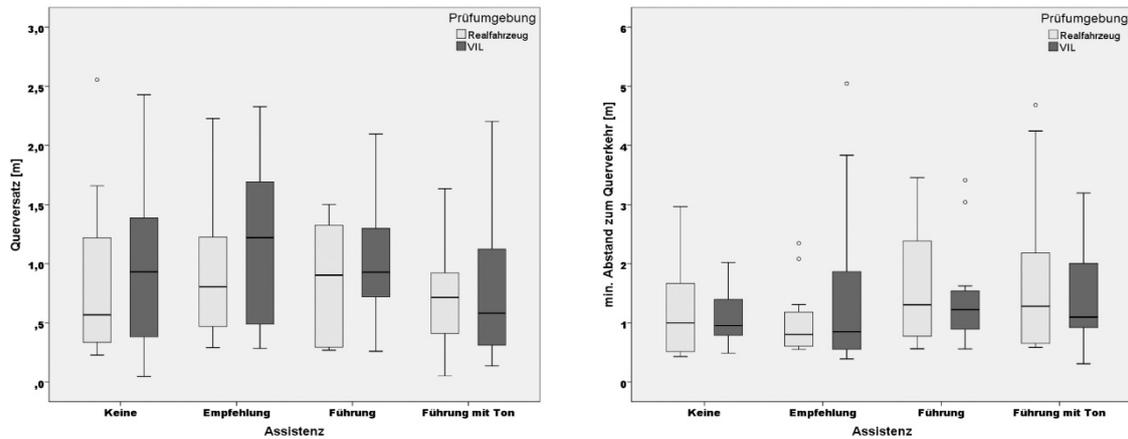


Abbildung 87: Prüfumgebung - Querversatz (links, $n = 96$) und minimaler Abstand zum Querverkehr (rechts, $n = 96$)

Auch die gemessenen Extrema des Handlenkmoments weisen in beiden Prüfumgebungen sehr ähnliche Werte auf (vgl. Abbildung 88). Vor allem die Streubreite des maximalen Handlenkmoments beim System Führung (mit Ton) nimmt nahezu identische Ausmaße an, das wie bereits diskutiert, Rückschlüsse auf die unterschiedlichen Verhaltensmuster bei freiem bzw. belegtem Gegenfahrstreifen zulässt. In der Varianzanalyse traten erwartungsgemäß keine signifikanten Unterschiede auf (siehe Anhang C, Tabelle 38). Die Berechnung von Korrelationskoeffizienten belegt einen signifikanten Zusammenhang zwischen den Ergebnissen in beiden Prüfumgebungen (vgl. Anhang C, Tabelle 40).

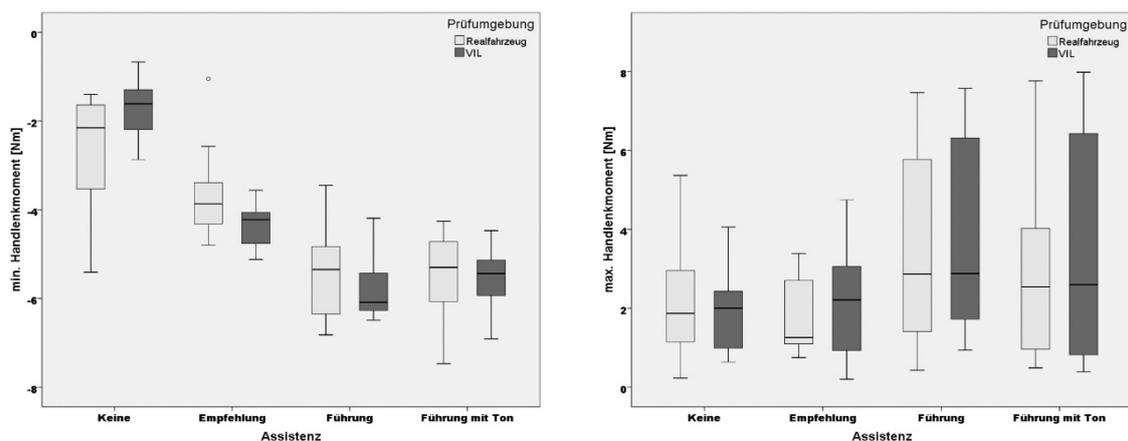


Abbildung 88: Prüfumgebung - minimales und maximales Handlenkmoment ($n = 96$)

Eine geringere Auslenkbewegung wirkt sich auch auf die davon abhängigen Variablen wie z.B. die Querbeschleunigung aus. Deren Extrema (siehe Abbildung 89) fielen im VIL

signifikant niedriger als im Realfahrzeug (siehe Anhang C, Tabelle 38). Dennoch besteht zwischen den Messwerten in beiden Prüfumgebungen ein signifikanter Zusammenhang (vgl. Anhang C, Tabelle 40).

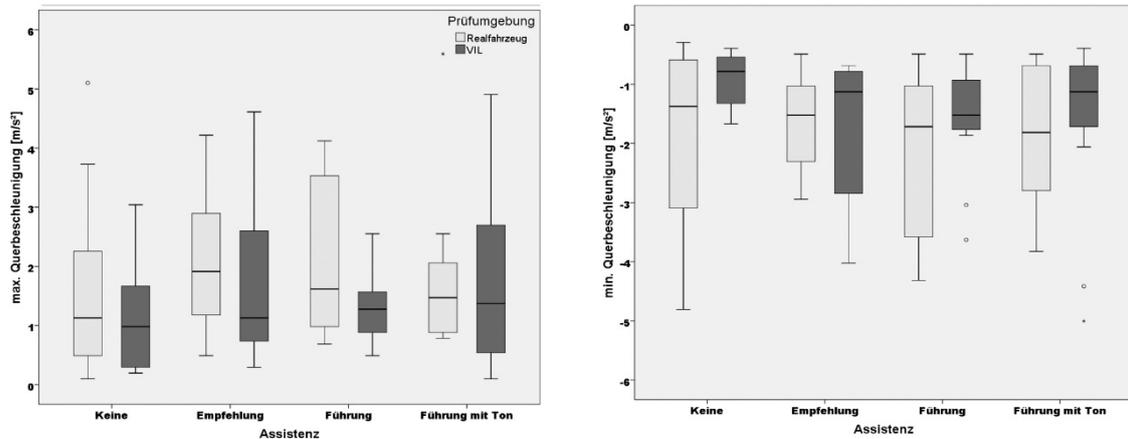


Abbildung 89: Prüfumgebung - maximale und minimale Querbeschleunigung ($n = 96$)

Die Gierrate ist die zweite vom Lenkverhalten des Fahrers abhängige Variable. Wie bei der Querbeschleunigung traten auch hier geringere Extremwerte im VIL auf (vgl. Abbildung 90). Bei der minimalen Gierrate sind diese Unterschiede deutlicher ausgeprägt, was durch einen signifikanten Unterschied bei der durchgeführten Varianzanalyse bestätigt wird (vgl. Anhang C, Tabelle 38). Für beide Variablen werden auch hier, trotz der gefundenen Unterschiede, bei der Berechnung der Korrelationskoeffizienten signifikante Zusammenhänge zwischen VIL und Realfahrzeug ermittelt (vgl. Anhang C, Tabelle 40).

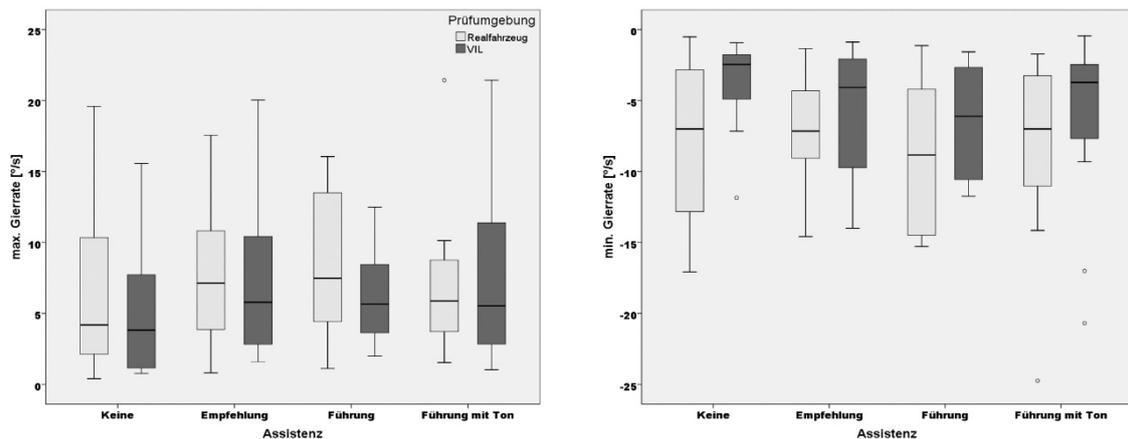


Abbildung 90: Prüfumgebung - maximale und minimale Gierrate ($n = 96$)

Die Verteilung der subjektiven Urteile anhand der SBFV-Skala sind für beide Prüfumgebungen in Abbildung 91 zu sehen. Die Fahrer schätzten die Kritikalität der Ausweichsituation im VIL etwas höher ein, wobei der Unterschied nicht signifikant ist (vgl. Anhang

C, Tabelle 38). Zwischen den Urteilen der Fahrer in beiden Prüfumgebungen besteht auch bei dieser Variable ein signifikanter Zusammenhang (vgl. Anhang C, Tabelle 40). Von 22 im Erstkontakt vergebenen "gefährlich"- Urteilen verteilen sich jeweils genau die Hälfte auf VIL und Realfahrzeug.

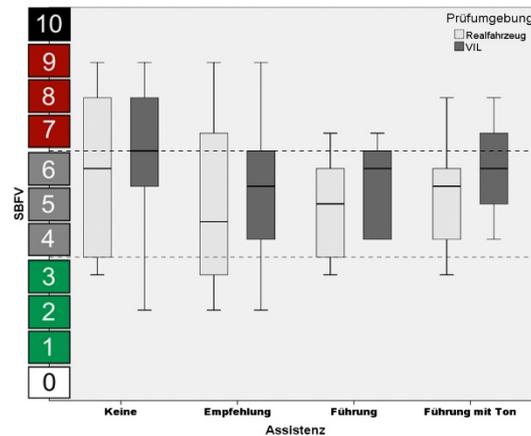


Abbildung 91: Prüfumgebung - SBFV-Urteil ($n = 48$)

5.3.4 Interpretation der Ergebnisse

Testfall 2 sollte die Interaktion von Fahrern mit Ausweichassistenzsystemen im Nutzenfall näher beleuchten (vgl. Tabelle 12). Der Fokus lag hierbei auf genereller Beherrschbarkeit der Systeme und der Absicherung möglicher Kollisionen mit Hindernissen auf dem Gegenfahrstreifen. Mit der Prüfumgebung VIL sollte zudem ein neuer methodischer Zugang für Kontrollierbarkeitsfragen evaluiert und bewertet werden.

In Kapitel 5.1.2 wurden Pass-/Fail-Kriterien für die betrachteten Testfälle abgeleitet, die verwendet und überprüft werden sollten. Bei keinem der Systemeingriffe in Testfall 2 wurden objektive Fail-Kriterien wie Kollisionen, Verlassen der Fahrbahn oder ESP-Eingriffe detektiert. Hinsichtlich der subjektiven Beurteilung der Fahrsituation mit Systemeingriff wurde das festgelegte Fail-Kriterium mit knapp 39% "gefährlich"-Urteilen deutlich überschritten. Bei der Betrachtung der Vergleichsgruppe ohne Systemeingriff lagen die "gefährlich"- Urteile mit 67% noch höher. Während die SBFV-Skala ein gutes Instrument für Testfall 1 darstellte, muss deren Anwendung als Fail-Kriterium bei Testfall 2 methodisch angezweifelt werden. In Testfall 1 wurde mit der Skala ausschließlich die Fahrsituation beurteilt, was den Probanden gut gelang. In Testfall 2 kommt nun aber der

Systemeingriff als zweite Dimension dazu. Zunächst liefert die Skala auch hier gute Hinweise für die erste Dimension der Fahrsituation. Sie zeigt, dass die gewählte Ausweichsituation, die für eine Kontrollierbarkeitsuntersuchung nötige Kritikalität aufwies. Der Eingriff von Assistenzsystemen entschärfte die Fahrsituation für den Fahrer subjektiv. Diese subjektive Entschärfung aufgrund des Eingriffs der Assistenzfunktionen hat allerdings nur indirekten Einfluss auf die Bewertung der Probanden. Wird die Gesamtsituation durch den Eingriff eines FAS entschärft, spiegelt sich das zwar in leicht geringeren Werten auf der SBFV-Skala wieder, dennoch wird von den Probanden hauptsächlich die Fahrsituation und nicht der Eingriff bewertet. Als hartes Fail-Kriterium zur Beurteilung der Kontrollierbarkeit der Assistenzsysteme darf die SBFV-Skala deshalb in diesem Zusammenhang nicht verwendet werden, da bereits die Fahrsituation selbst so kritisch gewählt ist, dass viele Urteile im "gefährlich"-Bereich zu erwarten sind.

Die subjektive Entschärfung der Fahrsituation durch den Eingriff von Assistenzsystemen wird vor allem durch eine deutlich frühere Fahrzeugreaktion erreicht, wodurch Manöver mit geringerer Intensität zur Vermeidung einer Kollision genügen. In der Vergleichsgruppe ohne Assistenz wurden teilweise heftige Verzögerungen oder hochdynamische Lenkmanöver ausgeführt. Bei letzteren benötigten die Fahrer oft bis weit nach dem Hindernis, um ihr Fahrzeug wieder in die ursprüngliche Fahrtrichtung zu steuern. Diese Beobachtung erfolgte ebenfalls beim System "Ausweichempfehlung", bei dem die Fahrer nur ein einseitiges Lenkmoment zur Initialisierung eines Ausweichmanövers aufgeschaltet bekamen. Auch hier wurde ein querkraftfreier Fahrzustand in Ursprungsrichtung erst deutlich nach dem Hindernis erreicht. Da der Auslenkvorgang aber merklich früher stattfand, als bei der Vergleichsgruppe ohne System, müssen hier noch andere Ursachen zu Grunde liegen. Zum einen wurden bei der Abschaltung des Moments nach 600 ms Schwingungen bei Handlenkmoment und Gierrate beobachtet, was bedeutet, der Fahrer benötigt nach der Abschaltung eine gewisse Zeitspanne, bis er diese Störgröße ausregelt. Zum anderen initiierte das System bei manchen Fahrern hochdynamische Ausweichmanöver mit großen Querversätzen. Um diese wieder zu korrigieren, brauchten die Fahrer deutlich mehr Wegstrecke als Fahrer die kleinere Querversätze herstellten.

Im Gegensatz dazu wurde bei der hinterlegten Funktion der Systeme "Führung" und "Führung mit Ton" ein Echtzeitregler verwendet, der einen Meter Querversatz als Sollgröße vorgegeben hatte. Durch den Einbezug der Fahrereingaben am Lenkrad konnten Schwingungen vermieden werden und die Fahrzeuge erreichten meist schon auf Höhe

des Hindernisses den gewünschten Zustand mit ursprünglicher Fahrtrichtung. Durch die Rücklenkbewegung des Systems wurden hochdynamische Ausweichmanöver mit extremen Querversätzen weitgehend vermieden und frühzeitig ein sicherer Fahrzustand hergestellt. Zu Beginn der Eingriffe aller Systemvarianten war während einer Phase von ca. 300 - 400 ms ein, dem EPS-Motor entgegenwirkendes Handlenkmoment zu messen. Dieses resultierte zunächst aus der Trägheit von Fahrer und Lenkrad und ging dann vermutlich in ein reflexartiges Festhalten des Lenkrads über. Nach der beschriebenen Zeitspanne, die je nach Fahrer leicht variieren konnte, begannen die Fahrer entweder aktiv mit dem System zu arbeiten oder dämpften dessen Wirkung bzw. arbeiteten aktiv dagegen. Bei der Variante "Führung mit Ton" wurde gleichzeitig zum Eingriff ein Warnton eingespielt. Tendenziell ist aus den Ergebnissen zu erkennen, dass bei der Gruppe mit Warnton die Fahrzeugreaktion etwas früher begann als beim System "Führung". Bei näherer Betrachtung lösten die Fahrer in der beschriebenen Phase zu Beginn meist etwas eher ihren Haltegriff am Lenkrad, was die frühere Fahrzeugreaktion erklärt. Ein aktives Mit-/Gegenlenken ist aber erst nach derselben Zeitspanne zu beobachten wie beim System "Führung". Auch bei allen anderen Variablen unterscheiden sich diese Systeme faktisch nicht. Weitere Ausnahme bildet die subjektive Wahrnehmung der Fahrsituation, die mit Warnton leicht kritischer beurteilt wird.

Die Belegung des Gegenfahrstreifens spielt bei der Interaktion mit den Assistenzsystemen eine entscheidende Rolle. Die Mehrzahl der Fahrer griff bei freiem Gegenfahrstreifen die Lenkbewegung der Assistenzsysteme auf und steuerte selbst aktiv um das Hindernis. Bei belegtem Gegenfahrstreifen dämpften die Fahrer hingegen die Systemeingriffe oder arbeiteten teilweise aktiv dagegen. Durch diese verschiedene Interaktion wiesen beinahe alle abhängigen Variablen signifikante Unterschiede beim Faktor "Gegenfahrstreifen" auf.

Für die Kontrollierbarkeit von Ausweichassistenzsystemen ist das eine bedeutende Erkenntnis, da sie zeigt, dass Fahrer Systemeingriffe situationsadäquat dämpfen können. So kann einerseits genügend Querversatz hergestellt werden, um einem querenden Fahrzeug auszuweichen, andererseits dem Eingriff entsprechend entgegengewirkt werden, um eine Kollision mit Hindernissen auf dem Gegenfahrstreifen zu vermeiden. Da auch sonst keine nicht-kontrollierbaren Ereignisse, wie mögliche Schreckreaktionen, während des Versuches beobachtet wurden, wird Testfall 2 als beherrschbar für den aufmerksamen Normalfahrer angesehen. Das gilt für alle betrachteten Systemvarianten.

Dennoch sollten die Hinweise für ein leichtes Aufschwingen beim System "Ausweichempfehlung" nicht vernachlässigt werden, die bei stärkeren Momenten oder noch steiler gerampten Signalverläufen evtl. problematisch werden könnten. Der adaptive Regler bei den Systemen "Führung (mit Ton)" zeigt eine deutlich geschmeidigere Interaktion mit dem Fahrer ohne Aufschwingen. Aufgrund der aktiven Rücklenkbewegung des Systems wird zu einem früheren Zeitpunkt ein sicherer Fahrzustand erreicht, was im Sinne der Kontrollierbarkeit anzustreben ist.

Ein methodischer Aspekt, der sich bei der Auswertung des Versuches zeigte, ist die bereits diskutierte mangelnde Eignung der SBFV-Skala als Fail-Kriterium im Nutzenfall. Die Verwendung der Coverstory und der Prüfumgebungswechsel während des Versuches lieferten jedoch zwei Datensätze von jeder Versuchsperson, die sich, außer beim subjektiven Rating, in keiner der betrachteten Variablen signifikant unterschieden. Auch die nähere Analyse der Signalverläufe und die Aussagen der Versuchspersonen bei der Befragung lassen schlussfolgern, dass der oft beschriebene Unterschied zwischen Erst- und Zweitkontakt bei Notfall-Assistenzsystemen durch diese Maßnahmen in den Fahrdaten nicht zu finden war.

Die Prüfumgebung VIL lieferte sehr ähnliche Ergebnisse wie das Realfahrzeug, die sich nur in wenigen Punkten unterscheiden. Ein bereits bei den KON-Parametern gefundener und diskutierter Aspekt, der auch hier wieder beobachtet wurde, sind die leicht erhöhten Subjektiv-Ratings im VIL, verglichen mit dem Realfahrzeug. Auch die ca. 0.3 s verspätete Reaktionszeit der Fahrer ohne System im VIL bewegt sich in den Größenordnungen, die in den KON-Parametern für Querverkehr ermittelt wurden. Im Gegensatz dazu ist die Ausweichsituation in Testfall 2 kritischer parametrisiert, weshalb die Fahrer im VIL bei späterer Reaktion heftiger reagieren müssen, um eine Kollision zu vermeiden. Mit Systemeingriff weicht die TTC bei Fahrzeugreaktion zwischen VIL und Realfahrzeug deutlich weniger ab, wobei im VIL die Reaktion tendenziell etwas später stattfindet. Bei Betrachtung der Signalverläufe schienen die Fahrer im VIL in der bereits mehrfach beschriebenen Phase zu Beginn des Eingriffs das Lenkrad minimal länger festzuhalten als im Realfahrzeug. Diese Beobachtung steht im Einklang mit den längeren Reaktionszeiten ohne System. Wenn auch die Fahrer mit Systemeingriff im VIL etwas länger brauchen, um die Fahrsituation wahrzunehmen und zu verarbeiten, werden sie minimal später aktiv mit oder entgegen des Systemeingriffs lenken. Die Ausweichbewegung an sich scheint davon

jedoch unberührt. So werden nahezu dieselben Querversätze und Abstände zum Querverkehr als auch Querbeschleunigungen und Gierraten in VIL und Realfahrzeug gemessen.

Bei allen betrachteten Variablen konnten signifikante Zusammenhänge zwischen VIL und Realfahrzeug durch die Berechnung von Korrelationen nachgewiesen werden. Für die Eignung des VIL als Prüfumgebung für Kontrollierbarkeitsfragen bedeutet das, dass die Fahrer-System-Interaktion valide im VIL untersucht werden kann. Wie bei den KON-Parametern für Querverkehrssituationen empfohlen, sollte auch bei Systemeingriffen der visuelle Reiz in Form des Querverkehrs minimal früher gesetzt werden als im Realfahrzeug. Somit könnte die leicht verzögerte Wahrnehmung der Fahrer im VIL kompensiert werden. Das gilt vor allem für Vergleichsgruppen ohne Systemeingriff. Da die Abweichung der Reaktionszeiten bei der Gruppe ohne System ähnlich wie bei den KON-Parametern bei etwa 0.3 s lag, scheint dieser Wert relativ konstant für querende Objekte zu sein.

5.4 Testfall 3: Kontrollierbarkeit von Falschauslösungen bei Ausweichsystemen

Der Nachweis zur Eignung des VIL für die Untersuchung von Ausweichassistenzsystemen im Nutzenfall wurde in Testfall 2 erbracht. Das Untersuchungsziel von Testfall 3 adressiert die Evaluation der VIL-Methodik und Erkenntnisse zur Beherrschbarkeit bei nicht-situationsadäquaten Eingriffen von Ausweichassistenzsystemen, sogenannten Falschauslösungen. Wie bereits in Kapitel 2.2 erläutert, können Falschauslösungen unterschiedliche Ursachen haben, die in ihrer Wirkung für den Fahrer aber letztendlich keinen Unterschied bedeuten. In Neukum et al. 2008b wurden dem Fahrer solche Falschauslösungen in Form von einseitigen Lenkmomenten aufgeschaltet. Dabei entstand auf der Basis von Subjektivurteilen ein fahrzeugunabhängiges Gierraten-Kriterium. Dieses besagt, dass bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h Gierraten von mehr als 4 °/s durch Aufschaltung von Stör-Momenten bei begrenztem Verkehrsraum als nicht beherrschbar gelten. Die Störungen wurden bei verschiedenen großen Lenkmomenten über einen Zeitraum über 1.5 s bei der Durchfahrt von Engstellen aufgeschaltet. Die in Testfall 2 eingesetzten Assistenzfunktionen unterschieden sich von den in Neukum et al. 2008b eingesetzten Störmomenten. Die Funktion "Ausweichempfehlung" griff nur 600 ms in die Lenkung ein, die Funktion "Führung (mit Ton)" beinhaltet eine Rücklenkphase. Um erste Erkenntnisse über die Kontrollierbarkeit von solchen Ausweichassistenz-Funktionen bei nicht-situationsadäquaten Eingriffen zu erlangen, sollen Falschauslösungen in einem Probandenversuch evaluiert werden. Dabei sind wie in Testfall 2 möglichst funktionsübergreifende Aussagen anzustreben.

Die Systemvarianten "Führung" und "Führung mit Ton" werden unverändert aus Testfall 2 übernommen. Da die Funktion "Ausweichempfehlung" in Testfall 2 nur das halbe Aktorpotential des EPS-Motors ausschöpfte, was sich unterhalb der angesprochenen Beherrschbarkeitsgrenze von Neukum et al. 2008b bewegt, nutzt die Funktion in Testfall 3 bei gleicher Charakteristik das volle Aktorpotential. Um Missverständnisse auszuschließen, wird die Funktion im Folgenden deshalb als "Lenkmoment" bezeichnet.

5.4.1 Versuchsdesign

Zur Absicherung von Falschauslösungen soll im Sinne effizienter Teststrategien der schlimmste, aber gleichzeitig auch nicht vollkommen unwahrscheinliche Fall untersucht

werden (vgl. Kapitel 3.1.1). Da in Testfall 3 der methodische Aspekt zur Evaluation der Prüfumgebung VIL Vorrang besaß, konnten diese Randbedingungen nicht in jeder Hinsicht eingehalten werden. Für Aussagen zur Eignung des VIL war erneut ein Abgleich mit dem Realfahrzeug vorgesehen. Dazu sollten die Fahrer, wie in Tabelle 12 zu sehen, eine Engstelle mit 50 km/h durchfahren. Am Ende dieser 2.5 m breiten Pylonengasse wurde die Falschauslösung aufgeschaltet, um einerseits beim Fahrer den Eindruck eines begrenzten Verkehrsraums noch präsent zu halten, andererseits bei möglichem Überqueren der Gassenbreite Schäden am Fahrzeug im Realversuch zu vermeiden.

Der ungünstigste Fall für eine Falschauslösung ist, wenn der Fahrer zuvor die Möglichkeit hatte, Vertrauen zum System bei berechtigten Auslösungen aufzubauen. Deshalb wurden die Falschauslösungen im Versuchsplan im Anschluss an die Nutzenfälle von Testfall 2 gestellt (siehe Tabelle 18). Nach der zweiten Ausweichsituation von Testfall 2 wurde der Fahrer aufgeklärt, dass Ausweichassistenzsysteme zentraler Aspekt der Studie waren. Der in der Coverstory angesprochene Vergleich von Engstellenfahrten zwischen VIL und Realfahrzeug wäre nichtsdestotrotz ein zusätzlicher Untersuchungsgegenstand und würde miterhoben werden. Der Fahrer sollte deshalb auf dem Weg zum Ausgang der Teststrecke noch die letzte Engstelle durchfahren, an deren Ende dann die Falschauslösung aufgeschaltet wurde.

Analog zu Testfall 2 wurden die Fahrer durch in der Coverstory eingebundene Nebenaufgaben, wie der Betätigung des Blinkers oder Scheibenwischers, indirekt zu einer fahrschulmäßigen Handhaltung instruiert. Nach der Falschauslösung wurden die Fahrer erneut über den Sinn der erlebten nicht-situationsadäquaten Auslösung aufgeklärt und subjektive Daten gemäß der Fragebögen in Anhang B erhoben. Die Bewertung der Kritikalität des Eingriffs erfolgte anhand der Störungsbewertungsskala (SBS), die bereits in Abbildung 9 erklärt wurde. Die objektiven Variablen wurden analog zu Testfall 2 ausgewertet. Das Fahrerkollektiv war ebenfalls identisch zu Testfall 2, wobei jeweils die Hälfte der VPn die Falschauslösung im VIL, die andere Hälfte im Realfahrzeug erlebte. Der Versuchsplan sah für Testfall 3 ein between-subjects- Design vor. Als unabhängige Variablen wurden die drei Assistenzsysteme und die beiden Prüfumgebungen variiert.

5.4.2 Auswertung und Ergebnisse

Der Auswertevorgang von Testfall 3 verlief analog zu Testfall 2. Eine Definition der abhängigen Variablen kann in Kapitel 5.3.3 nachgelesen werden.

Zur Auswertung des Faktors "Assistenz" wurde eine einfaktorielle ANOVA gerechnet (vgl. Bortz und Schuster 2010, S. 205-220). Lag bei einer abhängigen Variable ein signifikanter Unterschied (akzeptiertes Signifikanzniveau: $\alpha = .05$) bezüglich des Faktors "Assistenz" vor, wurden post-hoc t-Tests zwischen den drei Assistenzsystemen gerechnet. Dafür wurde das akzeptierte Signifikanzniveau über eine Bonferroni-Korrektur gemäß Bortz und Schuster (2010, S. 232) angepasst ($\alpha = .017$). Mögliche Unterschiede zwischen den Prüfumgebungen sollen statistisch über t-Tests für unabhängige Stichproben belegt werden (akzeptiertes Signifikanzniveau: $\alpha = .05$). Für alle t-Tests werden Effektgrößen in Form von Pearson's r berechnet (Field 2013, S. 532). Dabei gelten Effektgrößen von $r < .3$ als klein, über $.5$ als groß und dazwischen als mittel (Field 2013, S. 82). Ein Zusammenhang der Messdaten zwischen VIL und Realfahrzeug sollte allerdings nicht über fehlende Unterschiede belegt werden. Deshalb werden analog zur Ermittlung der KON-Parameter in Kapitel 4.1.2 Korrelationen zwischen VIL und Realfahrzeug berechnet. Für intervallskalierte Daten wird der Korrelationskoeffizient nach Pearson, für ordinalskalierte Daten, wie der subjektiven Bewertung anhand der SBS, die Korrelation nach Spearman berechnet. Werte, die eine z-Transformation von ± 3.29 über-/unterschreiten wurden gemäß Field (2013, S. 32) als Ausreißer gewertet und für die Auswertung nicht in Betracht gezogen. Die Ergebnisse der statistischen Tests sind im Anhang C in Tabelle 41 bis Tabelle 43 aufgeführt.

Zur Diskussion und Interpretation der Ergebnisse werden Boxplots aufgeführt, bei denen die Messwerte nach Prüfumgebung und Assistenz getrennt dargestellt sind. Die Systeme "Führung" und "Führung mit Ton" zielten wie im Nutzenfall auf einen Querversatz von einem Meter ab. Wie in Abbildung 92 links zu sehen, dämpften die meisten Fahrer das System, so dass im Mittel ca. 0.7 m Querversatz erzielt wurden. Vor allem beim System "Führung" folgten einige Fahrer dem System ohne dagegen zu arbeiten oder lenkten aktiv mit, wodurch größere Querversätze erzielt wurden. Ein signifikanter Unterschied zwischen den Assistenzvarianten liegt aber nicht vor (vgl. Anhang C, Tabelle 41). Ebenso wenig unterscheiden sich die Werte in den Prüfumgebungen VIL und Realfahrzeug signifikant (vgl. Anhang C, Tabelle 41), was auch durch die ähnlichen Verteilungen der Werte und Mediane in Abbildung 92 zu erkennen ist. Die Berechnung von Korrelationen

ergab signifikante Zusammenhänge zwischen den Querversätzen in beiden Prüfumgebungen (siehe Anhang C, Tabelle 43).

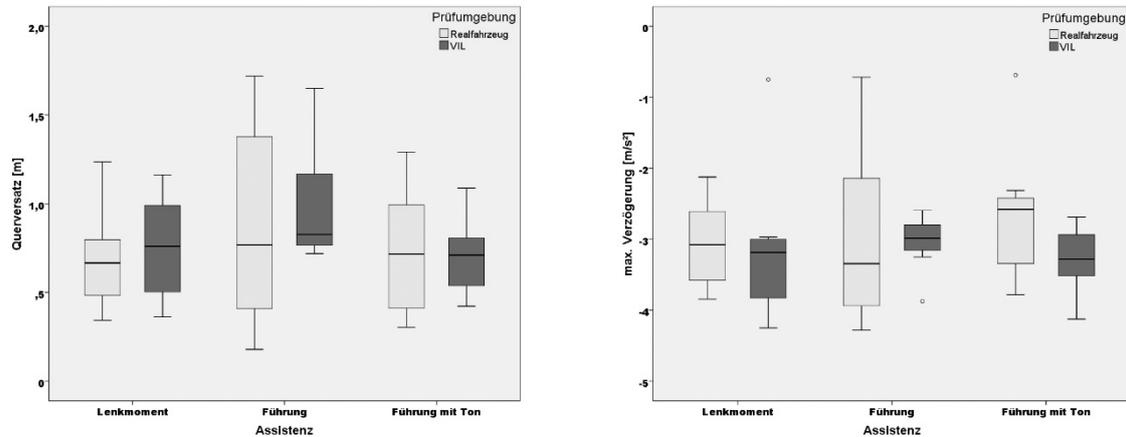


Abbildung 92: Falschauslösung - Querversatz (links, $n = 48$) und maximale Verzögerung (rechts, $n = 48$)

Bereits in Testfall 2 reagierten fast alle Fahrer auf einen Lenkeingriff durch eine Betätigung der Bremse, teilweise im Bereich von Vollbremsungen. Während das im Nutzenfall durchaus positive Effekte mit sich bringt, könnte es bei Falschauslösungen zu Konflikten mit dem Folgeverkehr führen. Wie in Abbildung 92 rechts zu sehen, betätigten auch bei der Falschauslösung die meisten Fahrer weitgehend unabhängig von der Systemvariante die Bremse. Die beobachteten maximalen Verzögerungen belaufen sich aber im Mittel auf -3 m/s^2 , was als Komfortbremsung bezeichnet werden kann. Starke Verzögerungen unter -5 m/s^2 oder Vollbremsungen unter -8 m/s^2 wurden nicht ausgeführt. Wie bereits im Boxplot zu erkennen, unterscheiden sich die Werte zwischen den beiden Prüfumgebungen wenig. Zwischen VIL und Realfahrzeug zeigen sich signifikante Zusammenhänge bei den maximalen Verzögerungen (vgl. Anhang C, Tabelle 43).

Durch die Auswertung des Handlenkmoments soll die Lenkradaktivität des Fahrers in Folge der Falschauslösung näher betrachtet werden. In Abbildung 93 sind die Extrema des Handlenkmomentes aufgeführt. In der Auslenkphase des Systems wirkt, wie schon in Testfall 2 erörtert, der Fahrer dem Moment des EPS-Motors zu Beginn für eine gewisse Zeitspanne entgegen, woraus in der Regel das gemessene Minimum resultiert. Dieses unterscheidet sich signifikant zwischen dem System "Lenkmoment" und den beiden anderen (vgl. Anhang C, Tabelle 42). In der Rücklenkphase ist beim System "Lenkmoment" der EPS-Motor nicht aktiv, weswegen sehr geringe Handlenkmomente gemessen werden. Bei den Systemen "Führung" und "Führung mit Ton" hängt die Intensität des Eingriffs in der

Rücklenkphase davon ab, wie viel Änderung in der Fahrtrichtung der Fahrer in der Auslenkphase zugelassen hat. Wie aus den Querversätzen und dem maximalen Handlenkmoment in Abbildung 93 zu sehen, wurde beim System "Führung" der Eingriff deutlich weniger gedämpft, wodurch teilweise hohe maximale Handlenkmomente in der Rücklenkphase auftreten. Zwischen dem System "Lenkmoment" und "Führung" sind die Werte signifikant unterschiedlich (vgl. Anhang C, Tabelle 42).

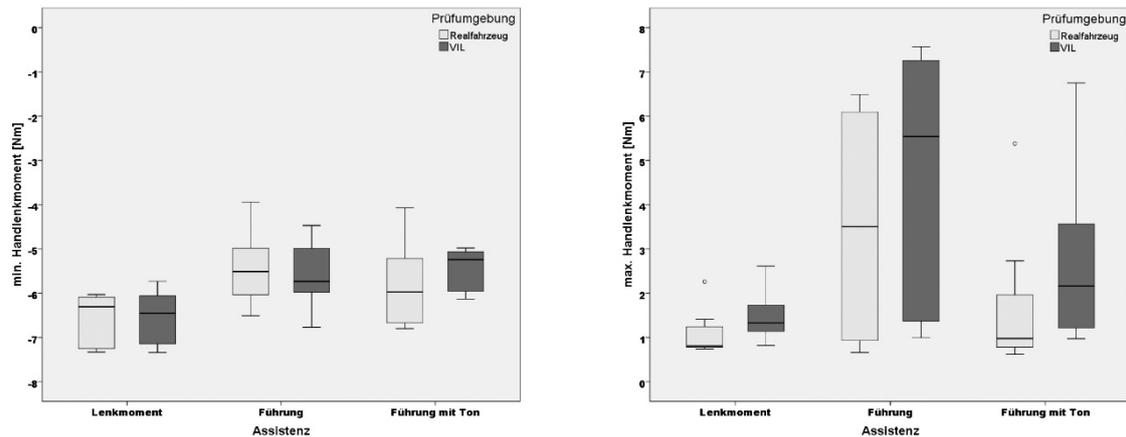


Abbildung 93: Falschauslösung - minimales und maximales Handlenkmoment ($n = 48$)

Die unterschiedlichen Interaktionen treten dabei weitgehend unabhängig von der Prüfungsgebung auf, was durch die ähnlichen Verteilungen in Abbildung 93 und die signifikanten Zusammenhänge bei der Berechnung der Korrelationskoeffizienten (vgl. Anhang C, Tabelle 43) belegt werden kann. Lediglich bei der Rücklenkphase scheinen die Fahrer im VIL etwas stärker gegen das System zu arbeiten, was durch die leicht erhöhten Werte beim maximalen Handlenkmoment zu sehen ist. Auffällig ist die große Streuung beim System „Führung“ in der Rücklenkphase, die in beiden Prüfungsgebungen zu finden ist. Solche Streuungen lassen auf zwei verschiedene Verhaltensmuster schließen. Ein Teil der Fahrer wirkte dem System sehr stark, ein anderer Teil nur wenig entgegen.

Die Auswirkungen der Lenktätigkeit auf die Fahrzeugbewegung werden durch die Querbeschleunigung und die Gierrate charakterisiert. In Abbildung 94 sind die Extrema der Querbeschleunigung dargestellt. In der Auslenkphase werden bei fast allen Systemvarianten Maximalwerte von durchschnittlich 1.5 m/s^2 erreicht. D.h. die Werte sind weit vom fahrphysikalischen Grenzbereich entfernt, weswegen auch keine ESP-Eingriffe gemessen wurden. Bei der maximalen Querbeschleunigung existieren weder zwischen den Assistenzsystemen noch zwischen den Prüfungsgebungen signifikante Unterschiede (vgl. Anhang C, Tabelle 41), obwohl die Werte im VIL leicht niedriger liegen.

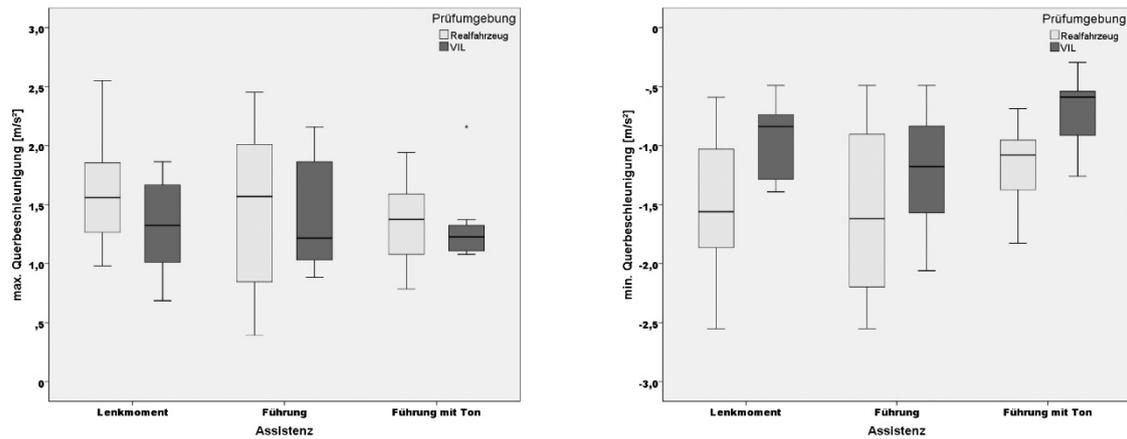


Abbildung 94: Falschauslösung - maximale und minimale Querbeschleunigung ($n = 48$)

In der Rücklenkphase unterscheiden sich die Systemvarianten auch nicht signifikant, allerdings sind die Beträge der minimalen Querbeschleunigungen im VIL signifikant niedriger als im Realfahrzeug (vgl. Anhang C, Tabelle 41). Die Verteilung der Werte ist aber auch hier bis auf den Versatz sehr ähnlich, weshalb bei der Berechnung von Korrelationskoeffizienten für maximale und minimale Querbeschleunigung ein signifikanter Zusammenhang zwischen VIL und Realfahrzeug nachgewiesen werden kann (vgl. Anhang C, Tabelle 43).

Die Extrema der Gierrate, die in Abbildung 95 dargestellt sind, verhalten sich ähnlich wie die der zuvor betrachteten Querbeschleunigung, außer dass keine signifikanten Unterschiede zu finden sind (vgl. Anhang C, Tabelle 41).

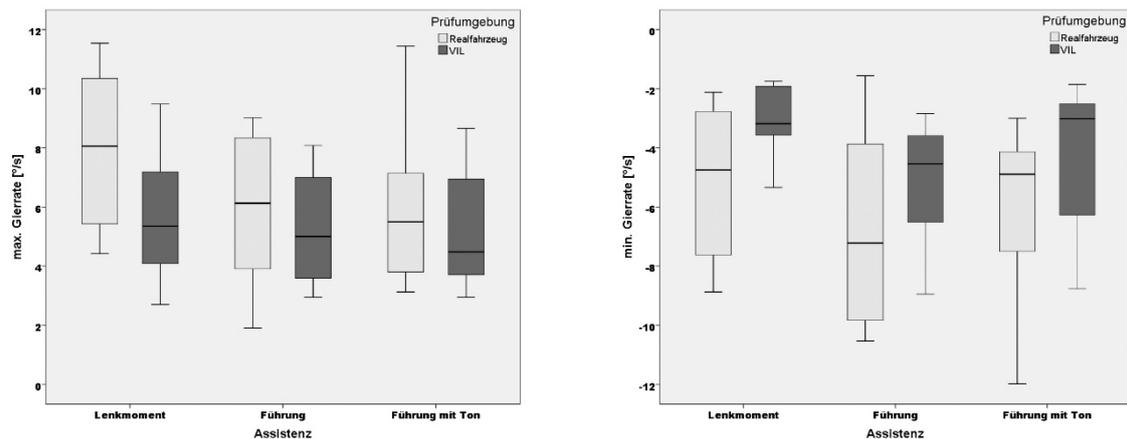


Abbildung 95: Falschauslösung - maximale und minimale Gierrate ($n = 48$)

Auch hier sind die Extrema im VIL niedriger als im Realfahrzeug, in der Rücklenkphase noch deutlicher als bei der maximalen Gierrate. Ein Unterschied zwischen den Systemvarianten könnte lediglich bei der maximalen Gierrate interpretiert werden, bei der das

Lenkmoment etwas höhere Werte aufweist. Berechnete Korrelationskoeffizienten belegen auch für diese Variable einen signifikanten Zusammenhang zwischen den Messwerten im VIL und im Realfahrzeug (vgl. Anhang C, Tabelle 43).

Bei der subjektiven Beurteilung anhand der SBS bezeichneten die meisten Probanden die Falschalauslösung als "störend". Nur wenige Fahrer vergaben ein Urteil im roten "gefährlich"-Bereich. Für das System "Führung" wurden zwei "gefährlich"-Urteile vergeben (entspricht 13%), wobei je eines in jeder Prüfumgebung zu finden war. Beim System "Führung mit Ton" wurden drei "gefährlich"-Urteile gezählt (entspricht ca. 19%) verteilt auf zwei im VIL und eines im Realfahrzeug. Insgesamt fielen die Urteile im VIL leicht kritischer aus, obgleich weder für die Assistenzvarianten noch für die Prüfumgebung ein signifikanter Unterschied besteht (vgl. Anhang C, Tabelle 41). Zwischen den SBS-Urteilen im VIL und im Realfahrzeug wurde ein signifikanter Zusammenhang festgestellt (vgl. Anhang C, Tabelle 43).

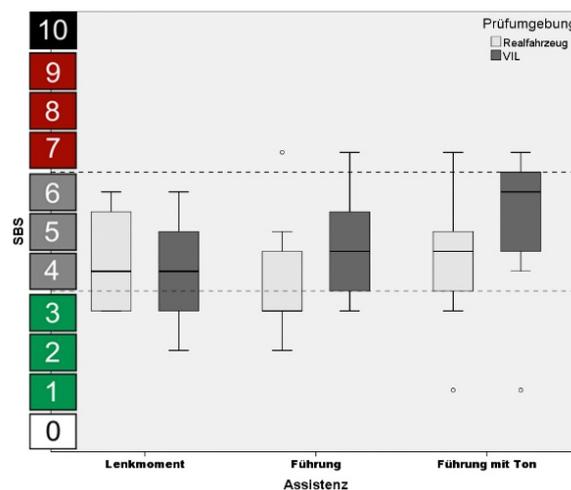


Abbildung 96: Falschalauslösung - SBS-Urteil ($n = 48$)

5.4.3 Interpretation der Ergebnisse

Bei der Untersuchung von Testfall 3 stand die Methodenentwicklung für künftige Absicherungsstrategien im Vordergrund. Deshalb waren die Randbedingungen des Versuchs darauf optimiert und stellten keine finale Kontrollierbarkeitsprüfung dar, auch wenn das Experiment Beherrschbarkeitsfragen adressierte. Ein belastbarer Nachweis der Kontrollierbarkeit würde verschärfte experimentelle Bedingungen erfordern, wie z.B. die Auslösung innerhalb einer Engstelle und eine Anpassung der Stichprobengröße pro Gruppe

entsprechend den Hinweisen in Kapitel 3.1.4. Aus dem, in einer frühen Phase des Entwicklungsprozesses durchgeführten, Probandenversuch können dennoch wichtige Erkenntnisse in Bezug auf die Kontrollierbarkeit von Falschauslösungen bei Ausweichassistenzsystemen gezogen werden.

Im Gegensatz zu Bremseingriffen (vgl. Kobiela 2011) verleiten die getesteten Ausweichassistenzsysteme den Fahrer bei Falschauslösungen nicht zu starken Bremsmanövern. Kein Fahrer zeigte Schreckreaktionen oder führte sein Fahrzeug in den fahrphysikalischen Grenzbereich. Wenige Fahrer folgten den unberechtigten Lenkeingriffen oder führten davon initiiert ihrerseits ein Ausweichmanöver durch. Diese Beobachtung trat vermehrt beim System "Führung" auf. Trotz gleicher Funktion am Lenkrad dämpften die meisten Fahrer mit zusätzlichem Warnton beim System "Führung mit Ton" die unberechtigten Eingriffe. In Testfall 2 dämpften alle Fahrer berechnete Eingriffe mit denselben Funktionen, wenn der seitliche Manöverraum tatsächlich begrenzt war. Bei den Falschauslösungen könnte deshalb die Auslösung am Gassenende, bei der die Fahrer faktisch die Engstelle schon verlassen hatten, dazu geführt haben, dass sich wenige Fahrer nicht zu einer Gegenreaktion veranlasst sahen.

Die Subjektivurteile der entsprechenden Fahrer lassen ebenfalls nicht darauf schließen, dass sie den Eingriff nicht willentlich zugelassen hätten. Bei diesen Subjektivurteilen wurden allerdings bei den Systemen "Führung" und "Führung mit Ton" wenige "gefährlich"-Urteile vergeben. Im Vergleich zum Rest der Stichprobe lagen die zugehörigen objektiven Werte der Probanden, die ein "gefährlich"-Urteil abgaben, im unteren Durchschnitt. D.h. die Fahrer dämpften den Eingriff besonders stark, wodurch nur wenig Querversatz und Querdynamik entstand, also im Sinne der Kontrollierbarkeit vorbildlich.

Obwohl sich die Funktionen "Führung" und "Führung mit Ton" nur durch den zusätzlichen Warnton unterscheiden, fielen die Subjektivurteile bei "Führung mit Ton" deutlich kritischer aus. Das Fail-Kriterium von maximal 15% Urteilen in diesem Bereich wäre mit 19% sogar leicht überschritten worden. Für künftige Kontrollierbarkeitsuntersuchungen sollte dieser Effekt berücksichtigt werden. Ein zusätzlicher Warnton kann die Subjektivurteile verschärfen und somit möglicherweise unnötig kritisch ausfallen lassen, obwohl die zugehörigen objektiven Messwerte gegenteiliges zeigen.

Wie bereits aus Testfall 2 und den KON-Parametern bekannt, fielen auch hier die Subjektivurteile im VIL etwas kritischer aus. Eine Auflockerung des 15%-Fail-Kriteriums

für die Prüfumgebung VIL scheint deshalb für künftige Versuche sinnvoll. Bei den objektiven Variablen ließen die Fahrer im VIL etwas geringere Lenkbewegungen zu als im Realfahrzeug. Diese resultierten auch in weniger Querbewegungen und kleineren Gierraten. Vor allem in der Rücklenkphase dämpften die Fahrer im VIL die Systemeingriffe wesentlich stärker, wodurch das Fahrzeug in vielen Fällen zunächst nicht parallel zum Fahrstreifen ausgerichtet wurde, sondern mit leicht verändertem Heading weiterfuhr. Dadurch wurden ähnliche maximale Querversätze erzielt wie im Realfahrzeug, die aber auf eine andere Art und Weise zu Stande kamen. Für die Eignung des VIL als Prüfumgebung für Kontrollierbarkeitsfragen bedeuten diese Resultate Folgendes: Bisherige Fahrerleistungen waren im VIL meist etwas schlechter als im Realfahrzeug, wodurch Resultate aus dem VIL als konservativ einzuschätzen waren. Hier liegt jetzt der Fall vor, dass Fahrer Eingriffe im VIL stärker dämpfen als im Realfahrzeug, also für eine Falschauslösung qualitativ besser reagieren. Eine Erklärung für diese Beobachtung sollte jedoch weniger in der Prüfumgebung VIL sondern in den Versuchsbedingungen auf der Teststrecke gesucht werden, wo die Vergleichsfahrten im Realfahrzeug stattfanden. Dort zeigten Fahrer mit denselben Systemen in Testfall 2, dass sie in der Lage sind die Eingriffe, angepasst an die Situation, entsprechend zu dämpfen. Bei der Falschauslösung sahen einige VPn vermutlich trotz vorheriger Durchfahrt einer Engstelle nicht die Notwendigkeit auf der breiten Teststrecke die Systemauslösung zu dämpfen. Im VIL könnte die ungewohnte Umgebung, wie bereits in Kapitel 4.1.3 diskutiert, den Ausschlag geben, ein konservativeres Verhalten an den Tag zu legen und den Eingriff stärker zu dämpfen. Als Konsequenz liegt hier kein Unterschied im Fahrerverhalten vor, der durch die Prüfumgebung bedingt wird, vielmehr müssen künftige Untersuchungen eine klare Motivation zur Gegenreaktion auf eine Falschauslösung in Form einer Manöverraumbegrenzung bieten.

Dass die beschriebenen Unterschiede aber nicht besonders groß sind und das Fahrerverhalten bis auf die zugelassene Intensität in VIL und Realfahrzeug signifikant zusammenhängt, haben die Berechnungen der Korrelationskoeffizienten gezeigt. Somit kann das VIL unter Beachtung der hier diskutierten Randbedingungen als geeignete Prüfumgebung für Kontrollierbarkeitsfragen bei Falschauslösungen von Ausweichassistenzsystemen eingesetzt werden.

5.5 Fazit

Im Sinne eines ganzheitlichen Ansatzes (vgl. Ebel et al. 2010; Huesmann et al. 2015) sollten für KAB-Funktionen Abschätzungen der Kontrollierbarkeit bereits in einer frühen Phase des Entwicklungsprozesses getroffen werden. Dabei wurde mit dem VIL eine Prüfumgebung eingesetzt, die neue methodische Zugänge ermöglichte. Ziel war es, diese Methode für künftige Kontrollierbarkeitsuntersuchungen zu evaluieren und zu etablieren. Aus den Ergebnissen einer Risiko- und Gefahrenanalyse für KAB-Systeme wurden in Anlehnung an Weitzel (2013b) zunächst Testfälle abgeleitet, die vor allem die Gefahr einer Kollision mit entgegenkommenden Fahrzeugen beim Eingriff eines Ausweichassistenzsystems absichern sollten. Diese Testfälle wurden im Anschluss mit der VIL-Methode untersucht. Die Ergebnisse werden im Folgenden kompakt zusammengefasst und in Form eines Fazits in den Kontext eingeordnet.

5.5.1 Kontrollierbarkeit von KAB-Systemen

Ziel von Testfall 1 war es, die Beherrschbarkeitsgrenze von KAB-Systemen für andere Verkehrsteilnehmer zu ermitteln. Dafür erlebten Fahrer Ausweicheingriffe von entgegenkommenden Fahrzeugen im VIL. Durch die Variation der Zeitlücke zum ausweichenden Fahrzeug, dessen Querversatz und der Dynamik des Ausweichmanövers wurde eine Grenze ermittelt, bei der aufmerksame Fahrer eine Kollision mit dem entgegenkommenden, ausweichenden Fahrzeug vermeiden können. Unter der Voraussetzung der Randbedingung von 3.5 m Fahrstreifenbreite konnten Fahrer Eingriffe von Systemen, die höchstens 1.25 m in den gegnerischen Fahrstreifen eindringen und die im höchsten Punkt der Ausweichtrajektorie noch einen zeitlichen Abstand von 2 s zum Fahrzeug der VP aufweisen, durch die Einleitung geeigneter Gegenmaßnahmen kontrollieren. Eingriffe, bei denen der eigene Fahrstreifen nicht verlassen wurde, erwiesen sich generell als unproblematisch für entgegenkommende Fahrer. Für die Konzeption von KAB-Systemen hat das folgende Konsequenz: Die Auslösung einer Funktion sollte bei potentieller Überschreitung des eigenen Fahrstreifens nur erfolgen, wenn sichergestellt werden kann, dass ausreichend zeitlicher Abstand zu möglichem Gegenverkehr vorliegt. Die genannten Parameter dürfen dabei nicht überschritten werden. Ist das nicht sichergestellt, darf die Ausweichbreite des KAB-Eingriffs nicht über den eigenen Fahrstreifen hinausgehen.

Testfall 2 adressierte eine ähnliche Fragestellung. Wieder stand die Absicherung von Kollisionen mit entgegenkommenden Fahrzeugen beim Eingriff eines Ausweichassistenzsystems im Fokus. Nur sollte dieses Mal untersucht werden, ob Fahrer mit Ausweichassistenzsystem an Bord entsprechende Eingriffe bei belegtem Gegenfahrstreifen situationsadäquat dämpfen können. Zum Zeitpunkt der Studie waren genaue Funktionsausprägungen für spätere Seriensysteme noch nicht bekannt, weshalb verschiedene Ausweichsysteme getestet wurden. Kurzzeitig eingreifende, gerichtete Lenkmomente vom Hindernis weg, die als eine Art Ausweichempfehlung den Fahrer selbst zum Ausweichen animieren sollten, führten teilweise zu unrunder Lenkverläufen und geringfügigen Schwingungen in Gierrate und Trajektorie. Je nach Fahrertyp und Belegung des Gegenfahrstreifens wurden mit diesem System teilweise starke Ausweichbewegungen von den Fahrern ausgeführt. Geregelte Systeme, die den Fahrer auf einer Idealtrajektorie um das Hindernis führen sollten, erwiesen sich in diesen Punkten vorteilhafter. Durch die systembedingte Rücklenkbewegung bewegten sich die Ausweichmanöver mit diesen Systemen in einem definierten Rahmen. Extreme Ausweichbewegungen wurden hier kaum beobachtet. Durch Einbezug der Fahrereingaben am Lenkrad mit einem Echtzeitregler konnten Schwingungen vermieden werden. Zu Beginn aller Eingriffe war bei der Fahrer-System-Interaktion in einer Zeitspanne von ca. 300 - 400 ms ein Moment am Lenkrad zu messen, das dem System entgegenwirkte. Es entstand zunächst durch die Trägheit von Fahrer und Lenkrad und dann durch ein reflexartiges Festhalten des Lenkrads durch den Fahrer. Nach dieser Zeitspanne begannen die Probanden aktiv mit oder entgegen des Systems zu lenken. Alle Fahrer mit belegtem Gegenfahrstreifen dämpften die Systemeingriffe entsprechend stark, so dass eine Kollision vermieden wurde. Bei keinem der Systeme kollidierten die Fahrer mit dem querenden Fahrzeug, das als Grund für den Eingriff circa einen Meter am rechten Rand in den eigenen Fahrstreifen eindrang. Im Rahmen der Kontrollierbarkeitsbewertung können folgende Aussagen getroffen werden: Fahrer können Eingriffe von Ausweichassistenzsystemen situationsadäquat dämpfen. Geregelte Systeme ermöglichen dabei eine rundere Fahrer-System-Interaktion, wodurch die Beherrschbarkeit verbessert wird. Da in keinem der getesteten Fälle ein nicht-kontrollierbares Ereignis verzeichnet wurde, kann allen Systemen für diesen Testfall Beherrschbarkeit attestiert werden.

Mit Testfall 3 sollten erste Erkenntnisse über Fahrer-System-Interaktionen bei der Falsch- auslösung eines Ausweichsystems erzielt werden. Wie in Testfall 2 wurden verschiedene Funktionen untersucht, wobei die Randbedingungen des Experiments aus methodischen

Gründen nicht einer strengen Kontrollierbarkeitsprüfung entsprachen. Der Manöverraum während der Auslösung war nicht beschränkt, weshalb die Fahrer keinen unmittelbaren Anlass hatten mit allen Mitteln dem System entgegenzuwirken. Dennoch dämpften die meisten Fahrer die Falschauslösungen. Bei den hier eingesetzten einseitigen Lenkmomenten, die mit maximaler Aktorintensität kurzzeitig eingriffen, war das Dämpfungsverhalten ausgeprägter als bei den bereits in Testfall 2 eingesetzten Systemen, die auf eine Idealtrajektorie regelten. Ein gleichzeitiger Warnton beim Systemeingriff veranlasste die Fahrer mit regelndem System stärker zu dämpfen. Die Erkenntnisse über die Kontrollierbarkeit von Falschauslösungen der Ausweichassistenzsysteme wurden aus methodischen Gründen ohne eine Beschränkung des Manöverraums durchgeführt und sind mit dieser Einschränkung gültig.

5.5.2 Methodisches Vorgehen

In Testfall 1 wurde ein Untersuchungsansatz gewählt, der bereits analog für Notbremsysteme von Fach et al. (2010) und Neukum et al. (2014) eingesetzt wurde. Hierbei erfolgte eine Einschätzung der Kontrollierbarkeit aus Sicht anderer Verkehrsteilnehmer. Mit dem VIL kam eine Prüfumgebung zum Einsatz, die eine exakte Parametrierung verschiedener Ausweichsituationen ermöglichte. Diese Situationen erlebten Fahrer dann aus Sicht des Gegenverkehrs in verschiedenen urbanen Szenarien. Zunächst war es notwendig, die entscheidenden Parameter für die äußere Wahrnehmung von Ausweichassistenzsystemen zu ermitteln und auf eine testbare Anzahl einzuschränken. Dafür wurden Human-Factors-Experten eingesetzt, die in einem Vorversuch die relevanten Parametersätze für einen Probandenversuch herausfuhren. Im Probandenversuch selbst konnte dann, mit einer vergleichsweise geringen Anzahl an Parametersätzen zur Charakterisierung von Ausweichsystemen, eine Grenze ermittelt werden, bis zu der ein aufmerksamer Normalfahrer eine Kollision mit einem entgegenkommenden Fahrzeug verhindern kann, in dem ein Ausweichsystem eingreift. Die Verkehrssituation kann dabei einen Einfluss auf die Fahrerleistung haben. Dieser methodische Hinweis lässt sich ableiten, da Fahrer bei entgegenkommenden Fahrzeugen, die ohne ersichtlichen Grund ein Ausweichmanöver durchführten, vermehrt durch starkes Bremsen reagierten. Ließen sich die Ausweichmanöver aus dem Kontext der Fahrsituation erschließen, lenkten die entgegenkommenden Fahrer vermehrt an den rechten Fahrstreifenrand, um die Situation zu entschärfen. Eine

visuelle Ablenkung am Straßenrand, die z.B. auch bei Schöner und Morys (2015) eingesetzt wurde, beeinflusst die Fahrerleistungen signifikant und verzögert die Einleitung von Gegenmaßnahmen zur Vermeidung von Kollisionen. Unabhängig davon, ob solche Ablenkungen bei Kontrollierbarkeitsstudien Berücksichtigung finden müssen, liefert die beschriebene Methode mit dem VIL die Möglichkeit dazu. Zusammenfassend konnte mit dieser Methodik bei vergleichsweise geringem Aufwand und hoher Sicherheit eine belastbare Grenze der Beherrschbarkeit ermittelt werden, die als Grundlage für die Serienentwicklung von KAB-Systemen herangezogen werden kann.

Während der Nachweis von validem Fahrerverhalten im VIL bereits bei der Ermittlung der KON-Parameter in Kapitel 4.1.2 erbracht wurde, blieb der Beleg für eine vergleichbare Interaktion von Fahrern mit Assistenzsystemen im VIL und somit eine Validierung der Gesamtmethodik bisher noch aus. Deshalb wurde in Testfall 2 ein Versuchsdesign gewählt, bei dem Fahrer sowohl im VIL als auch im Realfahrzeug einen Eingriff von Ausweichassistenzsystemen erlebten. Die Wirkungen der verschiedenen Systemvarianten sowie der Merkmale der Fahrsituation auf die Fahrer-System-Interaktion waren dabei in gleicher Weise im VIL und im Realfahrzeug zu beobachten. Bei allen abhängigen Variablen wurden signifikante Zusammenhänge zwischen den Messwerten in den beiden Prüfumgebungen erzielt. Durch einen Einsatz der in Kapitel 4.2 entwickelten Transferfunktionen kann das VIL als valides Tool für Kontrollierbarkeitsfragen von Ausweichassistenzsystemen eingesetzt werden kann. Der Prüfumgebungswechsel während des Versuchs wurde für die Versuchspersonen durch eine Coverstory begründet. Das hatte den Nebeneffekt, dass zwei Messungen pro VPn durchgeführt wurden, bei denen Lerneffekte vermieden werden konnten. Der Einsatz der SBFV-Skala zur Bewertung der Kritikalität der Ausweichsituation beim Eingriff der Systeme stellte sich als ungeeignetes Fail-Kriterium heraus, da die Parametrierung der Situation selbst schon zu kritisch gewählt war. Im Realfahrzeug wäre ein bewegtes Fahrzeug auf dem Gegenfahrstreifen zu gefährlich für Probandenversuche gewesen, weshalb eine Baustelle als statische Belegung eingesetzt wurde. Diese Abstraktion zeigte sich trotzdem als wirkungsvolle Manöverraumbegrenzung, obgleich die Wirkung von bewegten Objekten auf den Fahrer vergleichend für künftige Experimente bestimmt werden sollte.

In Testfall 3 wurde erneut ein Abgleich zwischen VIL und Realfahrzeug vorgenommen. In diesem Fall erlebten Versuchspersonen Falschauslösungen von Ausweichassistenzsystemen. Dabei arbeiteten die Fahrer im VIL tendenziell etwas stärker gegen die falschen

Systemeingriffe als im Realfahrzeug. Die Gründe für die leichten Abweichungen liegen vermutlich in der nicht vorhandenen Verkehrsraumbeschränkung (gleichermaßen in beiden Prüfumgebungen), die aber die Probanden im Realfahrzeug auf der Teststrecke nicht immer dazu veranlasste, den Eingriffen mit allen Mitteln entgegenzuwirken. Im VIL könnte die ungewohnte Umgebung zu konservativerem Verhalten geführt haben, wodurch den Falschauslösungen etwas stärker entgegengewirkt wurde. Dennoch gibt es in allen betrachteten Variablen signifikante Zusammenhänge zwischen den Messwerten in beiden Prüfumgebungen, weshalb auch hier dem VIL eine Eignung für Kontrollierbarkeitsprüfungen bescheinigt wird. Zur Korrektur möglicher Abweichungen sei auf das Verfahren der Transferfunktionen in Kapitel 4.2 hingewiesen. Für die belastbare Untersuchung von Falschauslösungen sollte aber in künftigen Studien der Manöverraum eingeschränkt werden. Ein letzter Aspekt, der hier nicht unerwähnt bleiben soll, ist die Wirkung von Warntönen auf Subjektivurteile. In Testfall 3 wurde festgestellt, dass zusätzliche Warntöne bei gleicher Assistenzfunktion zu höheren SBS-Urteilen führen können. Vor allem in Anbetracht des Einsatzes der SBS-Skala als Fail-Kriterium sollte diese Beobachtung berücksichtigt werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Vor dem Hintergrund der Zunahme des Individualverkehrs in urbanen Räumen werden in aktuellen Forschungsinitiativen wie UR:BAN (Lehsing et al. 2013) aktive Sicherheitssysteme zur Senkung von Unfallzahlen im Stadtverkehr entwickelt. Im Fokus stehen dabei Systeme zur Kollisionsvermeidung durch Ausweichen und Bremsen (KAB). Solche Systeme ermöglichen speziell bei stehenden Hindernissen oder hohen Differenzgeschwindigkeiten zu Kollisionsobjekten eine Vermeidung von Unfällen zu späteren Eingriffszeitpunkten, an denen ein erfolgreiches Bremsmanöver bereits physikalisch unmöglich ist (Winner 2015). Diese Fahrerassistenzsysteme, die kurzfristig in Notfallsituationen massiv in die Fahrzeugführung eingreifen, haben nicht nur juristisch eine Sonderstellung (vgl. Gasser et al. 2015), sondern bedürfen auch spezieller Absicherung vor Serienzulassung. Im Rahmen der funktionalen Sicherheit werden elektrische bzw. elektronische Fehler (e/e-Fehler) betrachtet, die zu ungewollten oder ausbleibenden Eingriffen führen könnten. Mit der ISO-Norm 26262 existiert hier eine Richtlinie, die abhängig von Expositionswahrscheinlichkeit, Schadensschwere und Beherrschbarkeit eines Fehlers eine maximale Auftretenswahrscheinlichkeit festlegt (ISO 26262-3 2011). Falschauslösungen von Systemen können allerdings auch andere Ursachen haben, wie beispielsweise eine Fehlinterpretation von Sensordaten. Diese werden als funktionale Unzulänglichkeit oder auch als nicht-situationsadäquate Auslösung bezeichnet (Weitzel 2013b). Da die Ursache für eine Falschauslösung für den Fahrer, als Träger der Konsequenzen, keine Rolle spielt (Färber 2015), fordern Ebel et al. (2010) und Huesmann et al. (2015) im Rahmen einer ganzheitlichen Betrachtung eine Anlehnung der Absicherung dieser nicht-situationsadäquaten Auslösungen an die ISO-Norm. Ein weiterer Aspekt, der speziell für hochdynamische Eingriffe von Notfall-Assistenzsystemen betrachtet werden muss, ist die Gebrauchssicherheit der Fahrer-System-Interaktion im Nutzenfall (Färber 2015). Alle genannten Ansätze der Absicherung haben gemein, dass sie die Beherrschbarkeit der Systeme durch den Fahrer, wenn auch aus unterschiedlichen Perspektiven oder Motivationen heraus, adressieren. Im Falle der ISO-26262, aber auch in Leitwerken, wie dem RESPONSE Code of Practice gefordert, müssen schon in frühen Phasen der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen Bewertungen zur Kontrollierbarkeit erfolgen (ISO 26262 2011; RESPONSE Consortium 2009). Für belastbare Aussagen ist es speziell für die Evaluation von Notfall-Assistenzsystemen essentiell valide Testmethoden bereitzustellen (Fecher et al. 2008). In dieser Arbeit wird eine Übersicht zu existierenden Leitwerken für

die Absicherung von Fahrerassistenzsystemen gegeben (vgl. Kapitel 2) und auf Aspekte einer validen Kontrollierbarkeitsprüfung eingegangen (vgl. Kapitel 3).

Ein nicht unwesentlicher Teil davon ist die Wahl einer geeigneten Prüfumgebung. Speziell die Tests von Notfall-Assistenzsystemen bergen hier besondere Anforderungen. Im Sinne effizienten Testens soll der Aufwand möglichst gering gehalten, gleichzeitig Sicherheit, Validität und Reproduzierbarkeit gewährleistet werden (Breuer 2012). Die Vorstellung verschiedener Prüfumgebungen und die Diskussion deren Vor- und Nachteile in Kapitel 3.2 kristallisiert das Vehicle in the Loop (VIL) als potentiell geeignete Testumgebung für Kontrollierbarkeitsfragen heraus. Bei diesem System fährt der Fahrer in einem realen Fahrzeug auf einer Teststrecke, wird aber über ein Head Mounted Display (HMD) visuell in eine vollständig virtuelle Welt eingebunden (vgl. Berg 2014). Um die Eignung des VIL nachzuweisen, werden verschiedene generische Fahrsituationen abgeleitet, mit denen für Kontrollierbarkeitsstudien erforderliche Parameter (KON-Parameter) bestimmt werden können. In einem Probandenversuch wurden diese Szenarien sowohl im VIL als auch im Realfahrzeug auf der Teststrecke von jeweils 30 VPn durchfahren. Dadurch konnte nachgewiesen werden, dass Fahrer im VIL vergleichbares Verhalten zeigen wie im Realfahrzeug. Unterschiede, die bei der Bestimmung der KON-Parameter (relevante Parameter zum Vergleich von Prüfumgebungen im Kontext von Kontrollierbarkeitsfragen) festgestellt wurden, sind in Richtung und Betrag bekannt und können bei Folgeuntersuchungen, speziell im Hinblick auf Pass-/Fail-Kriterien bei Kontrollierbarkeitsprüfungen, berücksichtigt werden. Alternativ werden Möglichkeiten zur Korrektur dieser Unterschiede aufgezeigt. Zum einen können Messungen im VIL über Transferfunktionen im Nachhinein korrigiert werden (vgl. Kapitel 4.2), zum anderen werden Hinweise zur präventiven Gestaltung von Versuchsszenarien gegeben (z.B. sollten verlängerte Fahrer-Reaktionszeiten im VIL bei der Gestaltung von Szenarien berücksichtigt werden).

Auf dieser Basis wurde mit dem VIL als Prüfumgebung eine Methode entwickelt, mit der exemplarisch Beherrschbarkeitsfragen von KAB-Systemen in einer frühen Entwicklungsphase untersucht wurden. Dazu wurde zunächst eine Risiko- und Gefahrenanalyse durchgeführt und in Anlehnung an Weitzel (2013b) drei relevante Testfälle für die Kontrollierbarkeitsbewertung von KAB-Systemen abgeleitet. Dabei wurden einerseits die ge-

nannten Aspekte der Beherrschbarkeit adressiert, andererseits sollte die entwickelte Methode, gemäß den Anforderungen in RESPONSE Consortium (2009), verifiziert und für finale Kontrollierbarkeitsfragen vor Serienreife etabliert werden.

In Testfall 1 wurden Eingriffe von KAB-Systemen aus der Perspektive entgegenkommender Fahrer untersucht. Ziel war es die Randbedingungen für die Auslösung einer KAB-Funktion näher zu bestimmen und damit mögliche Kollisionen mit dem Gegenverkehr abzusichern. Nach Voruntersuchungen mit einem Expertengremium kristallisierte sich während des Probandenversuchs eine klare Grenze der Beherrschbarkeit heraus. Fahrer können Eingriffe von KAB-Systemen in entgegenkommenden Fahrzeugen durch geeignete Gegenmaßnahmen, wie Bremsen oder Lenken an den rechten Fahrstreifenrand, entschärfen. Bei einer Mindest-Zeitlücke von 2 s zwischen dem höchsten Punkt der Trajektorie und dem entgegenkommenden Fahrzeug und einer minimalen Lücke von 2.25 m zwischen Ausweicher und Fahrstreifenrand, können aufmerksame Fahrer Kollisionen unter den untersuchten Randbedingungen vermeiden. Ausweichmanöver die den eigenen Fahrstreifen nicht überschritten, stellten für keinen entgegenkommenden Fahrer eine nicht kontrollierbare Bedrohung dar. Als Resultat sollten KAB-Systeme, die den eigenen Fahrstreifen potentiell überschreiten können die gefundenen Grenzwerte einhalten, anderenfalls ein Verlassen des Fahrstreifens verhindert werden.

In Testfall 2 sollten ebenfalls mögliche Kollisionen mit dem Gegenverkehr bei Eingriffen von KAB-Systemen untersucht werden. Dazu erlebten Probanden Eingriffe von Ausweichfunktionen auf Vorserienstand in einer Querverkehrssituation. Fahrer mit belegtem Gegenfahrstreifen konnten die Eingriffe situationsadäquat dämpfen, so dass einerseits eine Kollision mit dem Querverkehr vermieden, andererseits auch der eigene Fahrstreifen nicht verlassen wurde. Zur Verifikation der Testmethodik wurde ein Vergleich zwischen VIL und etablierten Verfahren im Realfahrzeug auf der Teststrecke durchgeführt. Die Fahrer-System-Interaktion im VIL zeigte keine merklichen Unterschiede zum Realfahrzeug. In allen betrachteten Variablen konnten signifikante Zusammenhänge zwischen den Messwerten in beiden Prüfumgebungen nachgewiesen werden. Testfall 3 untersuchte Falschauslösungen von KAB-Funktionen, ebenfalls mit dem Zweck der Methodvalidierung. Auch hier wurden Eingriffe in VIL und Realfahrzeug miteinander verglichen und wiederum signifikante Zusammenhänge nachgewiesen.

Durch die vorliegende Arbeit kann die Eignung der VIL-Methode zur Beantwortung von Kontrollierbarkeitsfragestellungen bestätigt werden. In einer Reihe virtueller Testverfahren zur Absicherung von Assistenzfunktionen, ermöglicht die Methode eine Einbindung des Fahrers in diesen Prozess. Fragestellungen der Kontrollierbarkeit für eingreifende Notfallassistenzsysteme können in beliebig komplexen Szenarien sicher und valide untersucht werden.

Vor dem Hintergrund der rasanten Entwicklungen im VR-Bereich sind in den nächsten Jahren deutlich verbesserte HMDs auf dem Markt zu erwarten. Eine technische Verbesserung des VIL in diesem Bereich des Visualisierungssystems könnte auch das Einsatzspektrum erweitern. Während bei eingreifenden Notfallassistenzsystemen vor allem die Fahrsituation und die erlebte Dynamik eine Rolle spielen, ist bei den meisten anderen Funktionen auch die Interaktion mit den Systemen in Form von Bedienvorgängen relevant. Eine Ansicht des Cockpits sowie der eigenen Hände des Fahrers wäre zur Evaluation zahlreicher solcher Fragestellungen unterschiedlicher FAS essentiell. Eine Möglichkeit das zu erreichen, wäre der Verzicht auf ein HMD und eine Projektion der Simulation in die Außenscheiben des Fahrzeuges (vgl. Riedl 2015). Berg (2014) stellte ein anderes Verfahren vor, wie diese Anforderung potentiell über Video-See-Through realisiert werden kann. Dabei wird dem Fahrer ein Videobild des eigenen Cockpits aus Ego-Perspektive im HMD angezeigt, wobei in die Außenscheiben die Ansicht der VR überlagert wird. Gemeinsam mit einem technisch verbesserten HMD könnte das VIL und somit auch mögliche Methoden zur Absicherung deutlich erweitert werden und auch für andere Arten von FAS attraktiv werden. Erste Systeme wie die Oculus Rift (Development Kit 2), die in diesem Zusammenhang Verbesserungen versprechen, wurden bereits getestet. Während Tragekomfort und die Größe des Sichtfelds den Ansprüchen schon genügen würden, ist die Pixelauflösung der getesteten Version noch nicht ausreichend. Eine rasante Weiterentwicklung in diesem Bereich ist aber zu erwarten, weshalb auf ausreichend performante HMDs nicht mehr lange zu warten sein wird. Die Flexibilität eines solchen verbesserten HMD-VIL bietet weit mehr Potential als eine Projektion in die Außenscheiben des Fahrzeuges und sollte in künftigen Weiterentwicklungen primär verfolgt werden.

Literaturverzeichnis

- Abendroth, B., & Bruder, R. (2012). Die Leistungsfähigkeit des Menschen für die Fahrzeugführung. In H. Winner, S. Hakuli, & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S. 4-14). Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag.
- Abendroth, B., & Bruder, R. (2015). Die Leistungsfähigkeit des Menschen für die Fahrzeugführung. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, & C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (S. 1-15). Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Abendroth, B., Bruder, R., Fuchs, K., & Schramm, T. (2009). Beurteilung von Systemen im Fahrzeug - welche Messmethoden sind geeignet? *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 63(03/2009), 223-231.
- Abendroth, B., Schreiber, M., Bruder, R., Maul, S., & Maul, D. (2012). Neue Ansätze zur Beurteilung der Fahrsimulatorvalidität. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 66(01/2012), 1-11.
- AKTIV (2011). *Ergebnisbericht: Aktiv - gemeinsam Zukunft erfahren*. URL: http://www.aktiv-online.org/deutsch/Downloads/Broschueren/Ergebnisbuch_aktiv_gesamt.pdf, Zugriff am: 24.06.2015.
- Andersen, G. J. (2011). Sensory and perceptual factors in the design of driving simulation displays. In D. L. Fisher, M. Rizzo, J. K. Caird, & J. D. Lee (Hrsg.), *Handbook of driving simulation for engineering, medicine, and psychology* (S. 8-1 - 8-11). Boca Raton: Taylor & Francis Group.
- Andersen, G. J., & Sauer, C. W. (2007). Optical information for car following: The driving by visual angle (DVA) model. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 49(5), 878-896.
- Armbrüster, C., Heber, I.-A., Valvoda, J. T., Fimm, B., & Spijkers, W. (2005). Distance estimation in a VR application: Interindividual differences and intraindividual stabilities from a psychological point of view. *11th International Conference on Human-Computer Interaction*. Las Vegas, USA. 22.-27.07.
- Bedard, M., Parkkari, M., Weaver, B., Riendeau, J., & Dahlquist, M. (2010). Assessment of driving performance using a simulator protocol: Validity and reproducibility. *The American Journal of Occupational Therapy*, 64(03-04/2010), 336-340.
- Bella, F. (2005). Validation of a driving simulator for work zone design. *Transportation Research Record*, 1937, 136-144.
- Bella, F. (2008). Driving simulator for speed research on two-lane rural roads. *Accident Analysis & Prevention*, 40, 1078-1087.
- Bender, E., Darms, M., Schorn, M., Stählin, U., Isermann, R., Winner, H., & Landau, K. (2007). Antikollisionssystem Proreta - Auf dem Weg zum unfallvermeidenden Fahrzeug: Teil 1: Grundlagen des Systems. *ATZ*, 109(04/2007), 336-341.
- Bender, E., Darms, M., Schorn, M., Stählin, U., Isermann, R., Winner, H., & Landau, K. (2007). Antikollisionssystem Proreta - Auf dem Weg zum unfallvermeidenden Fahrzeug: Teil 2: Ergebnisse. *ATZ*, 109(05/2007), 456-463.

- Bengler, K., Dietmayer, K., Färber, B., Maurer, M., Stiller, C., & Winner, H. (2012). *Die Zukunft der Fahrerassistenz*. URL: http://www.uni-das.de/documents/Strategiepapier_Uni-DAS.pdf, Zugriff am: 19.02.2015.
- Bengler, K., Dietmayer, K., Färber, B., Maurer, M., Stiller, C., & Winner, H. (2014). Three decades of driver assistance systems - review and future perspectives. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 6(4), 6-22.
- Bengler, K., & Mayser, C. (2003). Probandenversuche zur Beurteilung von Fahrerinformationssystemen und Fahrerassistenzsystemen - Lerneffekte und Lösungsansätze. In K. Landau & H. Winner (Hrsg.), *Fahrversuche mit Probanden - Nutzwert und Risiko. Darmstädter Kolloquium Mensch & Fahrzeug, Technische Universität Darmstadt*. Darmstadt. 03.-04.04. (S. 79-88). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Benminoun, M., Pütz, A., Zlocki, A., & Eckstein, L. (2014). Wirkungsanalyse von Abstandsregelung und Abstandswahrnehmung. In W. Siebenpfeiffer (Hrsg.), *Vernetztes Automobil. ATZ/MTZ-Fachbuch* (S. 27-36). Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Berg, G. (2014). *Das Vehicle in the Loop - Ein Werkzeug für die Entwicklung und Evaluation von sicherheitskritischen Fahrerassistenzsystemen* (Dissertation). Universität der Bundeswehr, München.
- Berg, G., Karl, I., & Färber, B. (2011). Vehicle in the Loop - Validierung der virtuellen Welt. In *Der Fahrer im 21. Jahrhundert. Fahrer, Fahrerunterstützung und Bedienbarkeit*. Braunschweig. 08.-09.11. (S. 143-154). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Bertram, M., & Bongard, S. (2014). *Elektromobilität im motorisierten Individualverkehr: Grundlagen, Einflussfaktoren und Wirtschaftlichkeitsvergleich*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Beusmans, J. M. (1998). Optic flow and the metric of the visual ground plane. *Vision Research*, 38(8), 1153-1170.
- Bittner, A. C., Simsek, O., Levison, W. H., & Campbell, J. L. (2002). On-road versus simulator data in driver model development: Driver performance model experience. *Transportation Research Record*, 1803, 38-44.
- Blaauw, G. J. (1982). Driving experience and task demands in simulator and instrumented car: A validation study. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 24(4), 473-486.
- Blana, E. (1996). *A Survey of driving research simulators around the world: Working Paper 481*. URL: <http://eprints.whiterose.ac.uk/2110/>, Zugriff am: 24.06.2015.
- Blana, E. (1996). *Driving Simulator Validation Studies: A Literature Review: Working Paper 480*. URL: <http://eprints.whiterose.ac.uk/2111/>, Zugriff am: 24.06.2015.
- Blana, E., & Golias, J. (2002). Differences between vehicle lateral displacement on the road and in a fixed-base simulator. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 44(2), 303-313.
- Blaschke, C., Breyer, F., Färber, B., Freyer, J., & Limbacher, R. (2009). Driver distraction based lane-keeping assistance. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 12(4), 288-299.
- Blaschke, C., Breyer, F., Färber, B., Freyer, J., & Limbacher, R. (2009). Spurhalteassistentz - Nutzen und Gefahren. In *Der Fahrer im 21. Jahrhundert. Fahrer, Fahrerunterstützung und Bedienbarkeit*. Braunschweig. 04.-05.11. (S. 95-106). Düsseldorf: VDI-Verlag.

- Bläser, D., & Schmidt, Alexander J. M. Arch. (2011). Mobilität findet Stadt: Zukunft der Mobilität für urbane Metropolräume. In H. Proff (Hrsg.), *Research. Zukünftige Entwicklungen in der Mobilität. Betriebswirtschaftliche und technische Aspekte* (S. 501-515). Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Gabler.
- Bock, T. (2008). *Vehicle in the Loop: Test- und Simulationsumgebung für Fahrerassistenzsysteme*. Audi Dissertationsreihe: Bd. 10. Göttingen: Cuvillier.
- Bock, T., Maurer, M., & Färber, G. (2007). Validation of the Vehicle in the Loop (VIL): A milestone for the simulation of driver assistance systems. In *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. Istanbul, Türkei. 13.-15.06., 621-617.
- Bock, T., Maurer, M., van Meel, F., & Müller, T. (2008). Vehicle in the Loop: Ein innovativer Ansatz zur Kopplung virtueller mit realer Erprobung. *ATZ*, 110(01/2008), 2-9.
- Bock, T., Siedersberger, K.-H., Zavrel, M., Breu, A., & Maurer, M. (2005). Simulations- und Testumgebung für Fahrerassistenzsysteme: Vehicle in the Loop (VIL). In *Erprobung & Simulation in der Fahrzeugentwicklung. Mess- und Versuchstechnik*. Würzburg. 16.-17.06. (S. 1-16). Düsseldorf: VDI Verlag.
- Bortz, J., & Schuster, C. (2010). *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler* (7., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage). *Springer-Lehrbuch*. Berlin: Springer.
- Boyle, L. N., & Lee, J. D. (2010). Using driving simulators to assess driving safety. *Accident Analysis & Prevention*, 42(3), 785-787.
- Braband, J. (2013). Funktionale Sicherheit. In L. Fendrich & W. Fengler (Hrsg.), *Handbuch Eisenbahninfrastruktur* (S. 553-606). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Breuer, J. (2003). Wie belastbar sind Ergebnisse aus Fahrversuchen mit Probanden? In K. Landau & H. Winner (Hrsg.), *Fahrversuche mit Probanden - Nutzwert und Risiko. Darmstädter Kolloquium Mensch & Fahrzeug, Technische Universität Darmstadt*. Darmstadt. 03.-04.04. (S. 78). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Breuer, J. (2009). Sicherheitsprognosen für neue Assistenzsysteme - Stand und Herausforderungen. In H. Winner & R. Bruder (Hrsg.), *Wie realitätsnah lässt sich Fahrverhalten messen? Neue Methoden und Werkzeuge*. Darmstadt. 18.-19.03. (S. 95-101). Stuttgart: Ergonomia.
- Breuer, J. (2012). Bewertungsverfahren von Fahrerassistenzsystemen. In H. Winner, S. Hakuli, & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S. 55-68). Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag.
- Breuer, K., & Christen, F. (2002). Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen unter Verwendung von SIL- und HIL-Techniken im Verkehrsflusssimulationsprogramm PELOPS. In S. Pischinger & H. Wallentowitz (Hrsg.), *11. Aachener Kolloquium - Fahrzeug und Motorentechnik*. Aachen. 09.-09.10. Aachen: FKA.
- Breyer, F., Berg, G., & Färber, B. (2010). *City ANB Plus - Fahrerverhalten während erwünschter und unerwünschter Auslösungen autonomer Notbremsungen bis 65 km/h* (unveröffentlichter Bericht). Neubiberg.
- Bruder, R., Fuchs, K., Abendroth, B., & Schramm, T. (2009). Zur Aussagekraft menschenbezogener Messgrößen in Fahrversuchen. In H. Winner & R. Bruder (Hrsg.), *Wie realitätsnah lässt sich Fahrverhalten messen? Neue Methoden und Werkzeuge*. Darmstadt. 18.-19.03. (S. 1-15). Stuttgart: Ergonomia.

- Brünger-Koch, M., Briest, S., & Vollrath, M. (2006). Do you feel the difference? A motion assessment study. *Driving Simulator Conference*. 31.05-02.06. Tsukuba, Japan.
- Bubb, H. (2003). Wie viele Probanden braucht man für allgemeine Erkenntnisse aus Fahrversuchen? In K. Landau & H. Winner (Hrsg.), *Fahrversuche mit Probanden - Nutzwert und Risiko. Darmstädter Kolloquium Mensch & Fahrzeug, Technische Universität Darmstadt*. Darmstadt. 03.-04.04. (S. 26-39). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Buld, S., Krüger, H.-P., Hoffmann, S., Kaussner, A., Tietzke, H., & Totzke, I. (2002). *Wirkungen von Assistenz und Automation auf Fahrerzustand und Fahrsicherheit: Abschlussbericht Projekt: EMPHASIS (Effort-Management und Performance-Handling in sicherheitsrelevanten Situationen)*. URL: http://www.psychologie.uni-wuerzburg.de/izvw/texte/2002_buld_krueger_Wirkungen_von_Assistenz_und_Automation.pdf, Zugriff am: 24.06.2015.
- Buld, S., Krüger, H.-P., Hoffmann, S., & Totzke, I. (2003). Die Fahrsimulation als Methode bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen. *Simulation und Simulatoren - Mobilität virtuell gestalten*. Hamburg. 15.-16.04.
- Carsten, O., & Nilsson, L. (2001). Safety assessment of driver assistance systems. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, (1(3)), 225-243.
- Casutt, G., Martin, M., Keller, M., & Jäncke, L. (2014). The relation between performance in on-road driving, cognitive screening and driving simulator in older healthy drivers. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 22, 232-244.
- Ceci, R., Högman, L., & Patten, C. (2001). Measures of driver behavior and cognitive workload in a driving simulator and in real traffic environment: Experiences from two experimental studies in Sweden. *First International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*. Aspen, USA. 14.-17.08.
- Charlton, J., Fildes, B. N., Oxley, J., Keffee, J., Odell, M., & Verdoon, A. (2008). Driving performance and visual search associated with visual field loss. *4th International Conference on Traffic and Transport Psychology*. Washington D.C., USA. 31.08.-04.09.
- Chatziastros, A. (2003). *Visuelle Kontrolle der Lokomotion* (Dissertation). Justus-Liebig-Universität, Gießen.
- Chen, L.-k., & Ulsoy, A. G. (2002). Experimental validation of a robust steering assist controller on a driving simulator. In *Proceedings of the American Control Conference*. Anchorage, USA. 08.-10.05, 2528-2533.
- Christen, F., Zlocki, A., & Becher, T. (2009). Sicherheitspotentiale von Fahrerassistenzsystemen in Nutzfahrzeugen. *1. Automobiltechnisches Kolloquium*. München. 16.-17.04.
- Colbourn, C. J., Brown, I. D., & Copeman, A. K. (1978). Drivers' judgments of safe distances in vehicle following. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 20(1), 1-11.
- Commission of the European Union. (2006). Commission recommendation on safe and efficient in-vehicle information and communication systems: update of the European Statement of Principles on human machine interface. *Official Journal of the European Union*, (L 32), 200-241.

- Correia Gracio, B. J., Wentink, M., Valente Pais, A. R., van Paassen, M. M., & Mulder, M. (2011). Driver behavior comparison between static and dynamic simulation for advanced driving maneuvers. *Presence*, 20(2), 143-161.
- Daimler Chrysler. (2005). Grünes Licht für mehr Sicherheit - Radarsensoren erkennen Gefahren, warnen und unterstützen den Fahrer. *Hightech-Report - Faszination Forschung und Technik*, 1/2005, 53-59.
- Damböck, D., Farid, M., Tönert, L., & Bengler, K. (2012). Übernahmezeiten beim hochautomatisierten Fahren. 5. *Tagung Fahrerassistenz. Schwerpunkt Vernetzung*. München. 15.-16.05.
- Dang, T., Desens, J., Franke, U., Gavrilu, D., Schäfers, L., & Ziegler, W. (2012). Steering and evasion assist. In A. Eskandarian (Hrsg.), *Handbook of Intelligent Vehicles* (S. 760-782). London, New York: Springer.
- Deery, H. A. (1999). Hazard and Risk Perception among Young Novice Drivers. *Journal of Safety Research*, 30(4), 225-236.
- Deml, B., Freyer, J., & Färber, B. (2007). Ein Beitrag zur Prädiktion des Fahrstils. In *Der Fahrer im 21. Jahrhundert. Human Machine Interface*. Braunschweig. 14.-15.11. (S. 47-59). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- DESTATIS. (2013). *Unfallursachen von Unfällen mit Personenschäden*. URL: <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/TransportVerkehr/Verkehrsunfaelle/Tabellen/UrsachenPersonenschaden.html>, Zugriff am: 24.06.2015.
- DIN VDE, 31000-2 (2011). Allgemeine Leitsätze für das sicherheitsgerechte Gestalten technischer Erzeugnisse - Teil 2: Begriffe der Sicherheitstechnik - Grundbegriffe. Berlin: Beuth.
- DIN VDE, 31000 (2011). Risikomanagement - Grundsätze und Leitlinien [Norm-Entwurf]. Berlin: Beuth.
- Dingus, T. A., Klauer, S. G., Neale, V. L., Petersen, V. L., Lee, A., Sudweeks, J., & Knippling, R. R. (2006). *The 100-Car Naturalistic Driving Study, Phase II - Results of the 100-Car Field Experiment*. URL: <http://www.nhtsa.gov/DOT/NHTSA/NRD/Multimedia/PDFs/Crash%20Avoidance/Driver%20Distraction/100CarMain.pdf>, Zugriff am: 23.03.2015.
- Distler, H. (2003). *Wahrnehmung in virtuellen Welten* (Dissertation). Justus-Liebig-Universität, Gießen.
- Domsch, C., & Negele, H. (2008). Einsatz von Referenzfahrtsituationen bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen. 3. *Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz*. München. 07.-08.04.
- Donges, E. (2012). Fahrerverhaltensmodelle. In H. Winner, S. Hakuli, & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S. 15-23). Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag.
- Dorn, L., & Barker, D. (2005). The effects of driver training on simulated driving performance. *Accident Analysis & Prevention*, 37(1), 63-69.
- Dukic, T., Edler, H., Ekström, J., Gellerman, H., Jacobsen, J., Jansson, J., & Waalivara, B. (2007). *Study results: feasibility study for the setting-up of a performance testing programme for ICT-based safety systems for road transport*. URL: <http://www.its->

- elearning.net/common/docsDownload.asp?c=68&f=doc333_1.pdf, Zugriff am: 24.06.2015.
- Ebel, S., Wilhelm, U., Grimm, A., & Sailer, U. (2010). Ganzheitliche Absicherung von Fahrerassistenzsystemen in Anlehnung an ISO 26262. In *Fahrerassistenz und integrierte Sicherheit*. 26. VDI/VW-Gemeinschaftstagung. Wolfsburg. 06.-07.10. (S. 393-405). Düsseldorf: VDI Verlag.
- 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 Enhanced Safety of Vehicles*. Washington D.C., USA. 13.-16.06.
- Eckstein, L., & Zlocki, A. (2013). Safety potential of ADAS - combined methods for an effective evaluation. *23rd International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*. Seoul, Republik Korea. 27.-30.05.
- Eichberger, A., Tomasch, E., Hirschberg, W., & Steffan, H. (2011). Potentiale von Systemen der aktiven Sicherheit und Fahrerassistenz. *ATZ*, 113(2011/07-08), 594-601.
- Eichinger, A., & Kellerer, J. (2014). Between laboratory and simulator: a cognitive approach to evaluating cockpit interfaces by manipulating informatory context. *Cognition, Technology & Work*, 16(3), 417-427.
- Ellims, M., Monkhouse, H. E., Harty, D., & Gade, T. (2013). Using vehicle simulation to investigate controllability. *SAE International Journal of Alternative Powertrains*, 2(1), 18-36.
- Eltaher, A. (2013). Testing of reconfigurable systems: A cognitive-oriented approach. In M. Maurer & H. Winner (Hrsg.), *Automotive Systems Engineering* (S. 249-268). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Engeln, A. (2003). Qualität und Quantität der Ergebnisse aus Fahrversuchen am Beispiel des Projekts SENECA. In K. Landau & H. Winner (Hrsg.), *Fahrversuche mit Probanden - Nutzwert und Risiko*. Darmstädter Kolloquium Mensch & Fahrzeug, Technische Universität Darmstadt. Darmstadt. 03.-04.04. (S. 66-77). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Engen, T. (2008). *Use and validation of driving simulators* (Dissertation). Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norwegen.
- Engström, J., Johansson, E., & Östlund, J. (2005). Effects of visual and cognitive load in real and simulated motorway driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 8(2), 97-120.
- Engström, J., & Ljung Aust, M. (2011). Adaptive behavior in the simulator: Implications for active safety system evaluation. In D. L. Fisher, M. Rizzo, J. K. Caird, & J. D. Lee (Hrsg.), *Handbook of driving simulation for engineering, medicine, and psychology* (S. 41-1 - 41-15). Boca Raton: Taylor & Francis Group.
- Euro NCAP. (2015). *Die offizielle Website von The European New Car Assessment Programme*. URL: <http://www.euroncap.com/de/>, Zugriff am: 15.03.2015.
- Fach, M., Baumann, F., Breuer, J., & May, A. (2010). Bewertung der Beherrschbarkeit von Aktiven Sicherheits- und Fahrerassistenzsystemen an den Funktionsgrenzen. In *Fahrerassistenz und integrierte Sicherheit*. 26. VDI/VW-Gemeinschaftstagung. Wolfsburg. 06.-07.10. (S. 425-435). Düsseldorf: VDI Verlag.

- Fancher, P., Ervin, R., Sayer, J., Hagan, M., Bogard, S., Bareket, Z., & Haugen, J. (1998). *Intelligent cruise control field operational test: Final Report*. URL: <http://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/1241/91076.0001.001.pdf>, Zugriff am: 24.06.2015.
- Färber, B. (1986). Abstandswahrnehmung und Bremsverhalten von Kraftfahrern im fließenden Verkehr. *Zeitschrift für Verkehrssicherheit*, 32, 9-13.
- Färber, B. (2005). Erhöhter Fahrernutzen durch Integration von Fahrerassistenz- und Fahrerinformationssystemen. In M. Maurer & C. Stiller (Hrsg.), *Fahrer-Assistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung* (S. 140-160). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Färber, B. (2015). Vom Tempomat zur automatischen Längsführung - Fragen und Antworten zur Beherrschbarkeit. In Klaffke, W. (Hrsg.), *Fahrerassistenz und aktive Sicherheit. Wirksamkeit - Beherrschbarkeit - Absicherung* (S. 112-122). Essen: expert Verlag.
- Färber, B., Breyer, F., & Färber, B. (2011). *Sicherheitspotential von Fahrerassistenzsystemen: Literaturstudie und Bewertung* (unveröffentlichter Bericht). Neubiberg.
- Färber, B., Färber, B., Siegener, W., & Süther, R. (2007). *Aufnahme von Wegweisungsinformationen im Straßenverkehr: AWewiS. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik: H. 979*. Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW Verl. für neue Wissenschaft.
- Färber, B., & Maurer, M. (2005). Nutzer- und Nutzen-Parameter von Collision Warning und Collision Mitigation Systemen. In M. Maurer & C. Stiller (Hrsg.), *3. Workshop Fahrerassistenzsysteme*. Walting im Altmühltal. 06.-08.04. (S. 47-55). Darmstadt: Uni-DAS.
- Faul, F., Erdfeller, 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(2), 175-191.
- Fausten, M. (2010). Accident avoidance by evasive manoeuvres. *4. Tagung Sicherheit durch Fahrerassistenz*. München. 15.-16.04.
- Fecher, N., Hoffmann, J., Winner, H., Fuchs, K., Abendroth, B., & Bruder, R. (2009). Aktive Gefahrenbremsung: Wie reagiert das Fahrer-Fahrzeug-System? *ATZ*, 111(02/2009), 144-150.
- Fecher, N., Regh, F., Habenicht, S., Hoffmann, J., & Winner, H. (2008). Test- und Bewertungsmethoden für Sicherheitssysteme der Bahnführungsebene. *at - Automatisierungstechnik*, 56(11), 592-600.
- Field, A. P. (2013). *Discovering statistics using IBM SPSS statistics: And sex and drugs and rock 'n' roll* (4th edition). London: Sage Publications Ltd.
- Fildes, B. N., Godley, S. T., Triggs, T. J., & Jarvis, J. (1997). *Perceptual countermeasures: Simulator validation study*. Monash University Accident Research Centre Homepage, URL: <http://www.monash.edu.au/miri/research/reports/atsb169.pdf>, Zugriff am: 24.06.2015.
- Fisher, D. L., Caird, J. K., Rizzo, M., & Lee, J. D. (2011). Handbook of driving simulation for engineering medicine and psychology: An overview. In D. L. Fisher, M. Rizzo, J. K. Caird, & J. D. Lee (Hrsg.), *Handbook of driving simulation for engineering, medicine, and psychology* (S. 1-1 - 1-16). Boca Raton: Taylor & Francis Group.

- Fisher, D. L., Pradhan, A. K., Pollatsek, A., & Knodler, M. A., Jr. (2007). Empirical evaluation of hazard anticipation behaviors in the field and on driving simulator using eye tracker. *Transportation Research Record*, 2018, 80-86.
- Fitch, G. M., Blanco, M., Morgan, J. F., & Wharton, A. E. (2010). Driver braking performance to surprise and expected events. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 54(24), 2075-2080.
- Follmer, R., Gruschwitz, D., Jesske, B., Quandt, S., Lenz, B., Nobis, C., & Mehlin, M. (2010). *Mobilität in Deutschland 2008: Ergebnisbericht: Struktur - Aufkommen - Emissionen - Trends*. URL: http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2008_Abschlussbericht_I.pdf, Zugriff am: 24.06.2015.
- Frey, A. (2014). *Statischer und dynamischer Fahrsimulator im Vergleich: Wahrnehmung von Abstand und Geschwindigkeit* (Masterarbeit). Heinrich-Heine-Universität, Düsseldorf.
- Friedrichs, A., Große-Kappenberg, S., & Happe, J. (2005). Erprobung von Fahrerassistenzsystemen mit dem Interactive Driving Simulator. In *Erprobung & Simulation in der Fahrzeugentwicklung. Mess- und Versuchstechnik*. Würzburg. 16.-17.06. (S. 37-55). Düsseldorf: VDI Verlag.
- Fuchs, K., Abendroth, B., & Bruder, R. (2008). Aktive Gefahrenbremsung - wie reagiert der Fahrer? *Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme. 24. VDI/VW Gemeinschaftstagung*. Wolfsburg. 29.-30.10.
- Gačnik, J., Jost, H., Köster, F., & Fränzle, M. (2011). The DeSCAS methodology and lessons learned on applying formal reasoning to safety domain knowledge. In E. Schnieder & G. Tarnai (Hrsg.), *FORMS/FORMAT 2010* (S. 207-215). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Galaske, P., Farid, M., & Bengler, K. (2014). Influence of expertise on the judgment of controllability of advanced driver assistance systems. In N. Stanton, G. Di Bucchianco, A. Vallicelli, & S. Landry (Hrsg.), *Advances in Human Aspects of Transportation. Proceedings of the 5th AHFE Conference*. Krakau, Polen. 19.-23.07., 460-467.
- Ganslmeier, T., Zawicki, K., Kern, A., Roth, E., & Neumann-Cosel, K. von (2010). Simulationsgestütztes Entwickeln und Testen von vorrausschauenden Assistenzfunktionen. In *Erprobung und Simulation in der Fahrzeugentwicklung. Mess- und Versuchstechnik*. Baden-Baden. 16.-17.11. (S. 153-163). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Gasser, T. M. (2012). *Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung: Gemeinsamer Schlussbericht der Projektgruppe. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen - Fahrzeugtechnik (F): Vol. 83*. Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW Verl. für neue Wissenschaft.
- Gasser, T. M. (2014). Rechtliche Rahmenbedingungen: Mensch und Maschine im Straßenverkehr. *Electronics in Vehicles - ELIV*. Baden Baden. 23.-24.09.
- Gasser, T. M., Seeck, A., & Smith, B. W. (2015). Rahmenbedingungen für die Fahrerassistenzentwicklung. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, & C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (S. 27-54). Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Gayko, J. (2005). Evaluierung eines Spurhalteassistenten für das "Honda Intelligent Driver Support System". In M. Maurer & C. Stiller (Hrsg.), *Fahrer-Assistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung* (S. 189-202). Berlin, Heidelberg: Springer.

- Gietelink, O., Ploeg, J., Schutter, B. de, & Verhaegen, M. (2006). Development of advanced driver assistance systems with vehicle hardware-in-the-loop simulations. *Vehicle System Dynamics*, 44(7), 569-590.
- Glauner, P., Blumenstock, A., & Haueis, M. (2014). Exposition zur Raffung der Felderprobung für Fahrerassistenzsysteme. In B. Färber (Hrsg.), *9. Workshop Fahrerassistenzsysteme*. Walting im Altmühltal. 26.-28.03. (S. 159-168). Darmstadt: Uni-DAS.
- Godley, S. T., Triggs, T. J., & Fildes, B. N. (2002). Driving simulator validation for speed research. *Accident Analysis & Prevention*, 34(1), 589-600.
- Götze, M., Conti, A. S., Keinath, A., Said, T., & Bengler, K. (2013). Evaluation of a new cockpit color concept under mesopic lighting for urban driving. In D. Hutchison, T. Kanade, J. Kittler, J. M. Kleinberg, F. Mattern, J. C. Mitchell, & A. Marcus (Hrsg.), *Lecture Notes in Computer Science. Design, User Experience, and Usability. Web, Mobile, and Product Design* (S. 359-366). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Grácio, B. J. Correia, Wentink, M., & Valente Pais, A. R. (2011). Driver behavior comparison between static and dynamic simulation for advanced driving maneuvers. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 20(2), 143-161.
- Hackenberg, U., & Heißing, B. (1982). Die fahrdynamischen Leistungen des Fahrer-Fahrzeug-Systems im Straßenverkehr. *ATZ*, 84(07/08/1982), 341-345.
- Hahn, S., Heinlein, S., & Zindler, K. (2012). Prüfmethode für vorrausschauende Sicherheitssysteme. *ATZ*, 114(11/2012), 840-844.
- Hakuli, S., Bruder, R., Flemisch, F., Löper, C., Rausch, H., Schreiber, M., & Winner, H. (2012). Kooperative Automation. In H. Winner, S. Hakuli, & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S. 641-650). Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag.
- Häring, J., Wilhelm, U., & Branz, W. (2009). Entwicklungsstrategie für Kollisionswarnsysteme im Niedrigpreis-Segment. *ATZ*, 111(03/2009), 182.
- Harms, L. (1996). Driving performance on a real road and in driving simulator: Results of a validation study. In A. G. Brown, I. D. Haselgrave, & S. Taylor (Hrsg.), *Vision in Vehicles V*. (S. 19-26). Amsterdam, Niederlande: Elsevier.
- Hartmann, B., Eckert, A., & Rieth, P. E. (2009). Emergency steer assist - Assistenzsystem für Ausweichmanöver in Notsituationen. In *12. Internationale VDI-Tagung Reifen-Fahrwerk-Fahrbahn. Im Spannungsfeld von Sicherheit und Umwelt*. Hannover. 20.-21.10. (S. 131-148). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Hebenstreit, B. von. (1961). *Grundzüge Einer Verkehrspsychologie*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Heesen, M., Dziennus, M., Hesse, T., Schieben, A., Brunken, C., Löper, C., & Baumann, M. (2015). Interaction design of automatic steering for collision avoidance: challenges and potentials of driver decoupling. *IET Intelligent Transport Systems*, 9(1), 95-104.
- Hentschel, P., König, P., Hartung, F., Jagusch, H., Dauer, P., & Floegel, J. (2011). *Strassenverkehrsrecht: Strassenverkehrsgesetz, Strassenverkehrs-Ordnung, Fahrerlaubnis-Verordnung, Fahrzeug-Zulassungsverordnung, Strassenverkehrs-Zulassungs-Ordnung, EG-Fahrzeuggenehmigungsverordnung (Auszug), Bussgeldkatalog, Gesetzesmaterialien, Verwaltungsvorschriften und einschlägige Bestimmungen des StGB und der StPO* (41., neu bearbeitete Auflage). München: Beck.

- Hess, A., Jung, J., Maier, A., Taib, R., Yu, K., & Itzstein, B. (2013). Elicitation of mental states and user experience factors in a driving simulator. In *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Gold Coast City, Australien. 23.-26.06., 43-48.
- Hesse, T., Schieben, A., & Heesen, M. (2013). Interaction design for automation initiated steering manoeuvres for collision avoidance. *6. Tagung Fahrerassistenz. Der Weg zum automatischen Fahren*. München. 28.-29.11.
- Hillenbrand, M. (2012). *Funktionale Sicherheit nach ISO 26262 in der Konzeptphase der Entwicklung von Elektrik/Elektronik Architekturen von Fahrzeugen* (Dissertation). Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Hinkelmann, K. (2008). *Design and Analysis of Experiments Set*. New York, USA: John Wiley & Sons Inc.
- Hoffman, J. D., Lee, J. D., Brown, T. L., & McGehee, D. V. (2002). Comparison of driver braking response in a high-fidelity simulator and on a test track. *Transportation Research Record*, 2, 59-65.
- Hoffmann, J., & Winner, H. (2007). Das Darmstädter Dummy Target EVITA -Ein Werkzeug zur Beurteilung von Antikollisionssystemen. In *Erprobung und Simulation in der Fahrzeugentwicklung. Mess- und Versuchstechnik*. Würzburg. 21.-22.06. (S. 343-357). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Hoffmann, J., & Winner, H. (2008). EVITA - Das Untersuchungswerkzeug für Gefahrensituationen. *3. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz*. München. 07.-08.04.
- Hoffmann, J., & Winner, H. (2008). EVITA - Die Prüfmethode für Antikollisionssysteme. In M. Maurer & C. Stiller (Hrsg.), *5. Workshop Fahrerassistenzsysteme*. Walting im Altmühltal. 02.-04.04. (S. 116-130). Darmstadt: Uni-DAS.
- Hoffmann, J., & Winner, H. (2012). EVITA - Das Prüfverfahren zur Beurteilung von Antikollisionssystemen. In H. Winner, S. Hakuli, & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S. 69-75). Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag.
- Hoffmann, S., Krüger, H.-P., & Buld, S. (2003). Vermeidung von Simulator Sickness anhand eines Trainings zur Gewöhnung an die Fahrsimulation. *Simulation und Simulatoren - Mobilität virtuell gestalten*. Hamburg. 15.-16.04.
- Homann, K. (2005). Wirtschaft und gesellschaftliche Akzeptanz: Fahrerassistenzsysteme auf dem Prüfstand. In M. Maurer & C. Stiller (Hrsg.), *Fahrer-Assistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung* (S. 239-244). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Hoskins, A. H., & Gindy, M. E. (2006). Technical report: Literature survey on driving simulator validation studies. *International Journal of Heavy Vehicle Systems*, 13(3), 241.
- Huber, B., & Schick, B. (2006). Methoden zur Rekonstruktion von Versuchsszenarien und die Bewertung von Funktion und Güte von Fahrerassistenzsystemen. *2. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz*. München. 26.03.
- Huesmann, A., Farid, M. & Muhrer, E. (2015). Von der Beherrschbarkeit zur Gebrauchssicherheit. Sicherheitsbewertung von Assistenzsystemen. In Klaffke, W. (Hrsg.), *Fahrerassistenz und aktive Sicherheit. Wirksamkeit - Beherrschbarkeit - Absicherung* (S. 139-163). Essen: expert Verlag.

- Hummel, T. (2011). *Fahrerassistenzsysteme: Ermittlung des Sicherheitspotenzials auf Basis des Schadensgeschehens der deutschen Versicherer. Forschungsbericht / Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V.: Unfallforschung der Versicherer : FS, Fahrzeugsicherheit / Unfallforschung der Versicherer*. Berlin: GDV.
- Hyungju Kwon, Itabashi-Campbell, R., & McLaughlin, K. (2013). ISO26262 application to electric steering development with a focus on Hazard Analysis. *7th Annual IEEE Systems Conference (SysCon)*. Orlando, USA.
- Ichikawa, K. (2003). *Considering safe distance between moving vehicles*. URL: <http://ci.nii.ac.jp/els/110000968647.pdf>, Zugriff am: 24.06.2015.
- ISO, 26262 (2011). Road vehicles - Functional Safety.
- ISO, 26262-1 (2011). Road vehicles - Functional Safety. Part 1 - Vocabulary.
- ISO, 26262-3 (2011). Road vehicles - Functional Safety. Part 3 - Concept Phase.
- INVENT. (2005). *Forschungsinitiative INVENT*. URL: <http://www.invent-online.de/de/projekte.html>, Zugriff am: 24.06.2015.
- Isermann, R., Bender, E., Bruder, R., Darms, M., Schorn, M., Stählin, U., & Winner, H. (2012). Antikollisionssystem PRORETA - Integrierte Lösung für ein unfallvermeidendes Fahrzeug. In H. Winner, S. Hakuli, & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S. 632-646). Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag.
- Ishida, S., & Gayko, J. E. (2004). Development, evaluation and introduction of a lane keeping assistance system. In *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Parma, Italien. 14.-17.06., 943-944.
- Itoh, M., Inagaki, T., & Horikome, T. (2011). Design and evaluation of situation-adaptive pedestrian-vehicle collision avoidance system. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics - SMC*. Anchorage, USA. 1063-1068.
- Jamson, H. (2001). Image characteristics and their effect on driving simulator validity. *First International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*. Aspen, USA. 14.-17.08.
- Jamson, H. (2011). Cross-platform validation issues. In D. L. Fisher, M. Rizzo, J. K. Caird, & J. D. Lee (Hrsg.), *Handbook of driving simulation for engineering, medicine, and psychology* (S. 12-1-12-13). Boca Raton: Taylor & Francis Group.
- Jamson, H., Wiffin, P., & Burchill, P. (2005). Driver response to active front steer and power-assist failures. *Driving Simulator Conference North America*. Orlando, USA. 30.11.-02.12.
- Jianqiang, W., Shengbo, L., Xiaoyu, H., & Keqiang, L. (2010). Driving simulation platform applied to develop driving assistance systems. *IET Intelligent Transport Systems*, 4(2), 121-127.
- Kafka, P. (2012). The Automotive Standard ISO 26262, the Innovative Driver for Enhanced Safety Assessment & Technology for Motor Cars. *Procedia Engineering*, 45, 2-10.
- Kaiser, R. (2009). Ergonomie-Absicherung des Fahrerarbeitsplatzes - Exemplarischer Einsatz und Eignung einer dynamischen Fahrsimulation. In H. Winner & R. Bruder (Hrsg.), *Wie realitätsnah lässt sich Fahrverhalten messen? Neue Methoden und Werkzeuge*. Darmstadt. 18.-19.03. (S. 29-42). Stuttgart: Ergonomia.

- Kaptein, N. A., Theeuwes, J., & van der Horst, R. (1996). Driving simulator validity: Some considerations. *Transportation Research Record*, 1550, 30-36.
- 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.
- Katzourakis, D. I., Velenis, E., Holweg, E., & Happee, R. (2014). Haptic steering support for driving near the vehicle's handling limits: Test-track case. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 15(4), 1781-1789.
- Keck, F., Kuhn, A., Sigl, S., Altenbuchner, M., Palau, T., Roth, F., & Zander, A. (2010). Prüf- und Evaluationsverfahren für den vorrausschauenden Fußgängerschutz im Spannungsfeld zwischen Simulation und realer Erprobung. In *Erprobung und Simulation in der Fahrzeugentwicklung. Mess- und Versuchstechnik*. Baden-Baden. 16.-17.11. (S. 407-416). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Keller, M., Hass, C., Seewald, A., & Bertram, T. (2014). Driving simulator study on an emergency steering assist. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics - SMC*. San Diego, USA. 05.-08.10., 3008-3013.
- Kemeny, A., & Panerai, F. (2003). Evaluating perception in driving simulation experiments. *TRENDS in Cognitive Sciences*, 7(1), 31-37.
- Kennedy, R. S., Fowlkes, J. E., Berbaum, K. S., & Lilienthal, M. G. (1992). Use of a motion sickness history questionnaire for prediction of simulator sickness. *Aviation Space and Environmental Medicine*, 63(7), 588-593.
- 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.
- Kerner, B. S., Hemmerle, P., Koller, M., Hermanns, G., Klenov, S. L., Rehborn, H., & Schreckenberg, M. (2014). Empirical synchronized flow in oversaturated city traffic. *Physical Review E*, 90(3), 1-5.
- Kirchner, A., Krüger, K., Mildner, F., & Schmidt, R. (2005). Ein fortgeschrittenes Kollisionsvermeidungssystem. *ATZ*, 107(01/2005), 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*. URL: <http://www.nhtsa.gov/DOT/NHTSA/NRD/Multimedia/PDFs/Crash%20Avoidance/2006/DriverInattention.pdf>, Zugriff am: 23.03.2015.
- Klee, H., Radwan, E., & Al-Deek, H. (1999). Preliminary validation of driving simulator based on forward speed. *Transportation Research Record*, 1689, 33-39.
- 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.-09.10.
- Knake-Langehorst, S. (2009). Nutzung des DLR Viewcars und des dynamischen Fahr-simulators als Bausteine zur Entwicklung verkehrsadaptiver Fahrerassistenz. In H. Winner & R. Bruder (Hrsg.), *Wie realitätsnah lässt sich Fahrverhalten messen? Neue Methoden und Werkzeuge*. Darmstadt. 18.-19.03. (S. 43-54). Stuttgart: Ergonomia.

- Knappe, G. (2009). *Empirische Untersuchungen zur Querregelung in Fahr simulatoren. Vergleichbarkeit von Untersuchungsergebnissen und Sensitivität von Messgrößen* (Dissertation). Friedrich-Alexander-Universität, Erlangen.
- Kobiela, F. (2011). *Fahrerintentionserkennung für autonome Notbremsysteme* (1. Auflage). *VS research : Verkehrspsychologie*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Kobiela, F., & Engeln, A. (2010). Autonome Notbremsmanöver: Studien zum Fahrerverhalten. *ATZ*, 112(10/2010), 702-706.
- Kompass, K., Domsch, C., & Kates, R. E. (2012). Integral safety. In A. Eskandarian (Hrsg.), *Handbook of Intelligent Vehicles* (S. 710-727). London, New York: Springer.
- Koppits, E., & Cropper, M. (2005). Traffic fatalities and economic growth. *Accident Analysis & Prevention*, 37, 169-178.
- Krems, J. (2013). Sicherheitspotential und Risiko von Fahrerassistenzsystemen: Wie intelligent darf bzw. muss ein Auto sein? *Fachtagung Fortschreibung des "VSP 2004 des Landes Brandenburg" mit Zielhorizont 2024*. Potsdam. 07.03.
- Krems, J., Henning, M., & Petzold, T. (2009). Methoden zur Messung von Fahrerverhalten: Vom Labor bis zur Feldstudie. In H. Winner & R. Bruder (Hrsg.), *Wie realitätsnah lässt sich Fahrverhalten messen? Neue Methoden und Werkzeuge*. Darmstadt. 18.-19.03. (S. 103-111). Stuttgart: Ergonomia.
- Kühn, M., & Hannawald, L. (2015). Verkehrssicherheit und Potentiale von Fahrerassistenzsystemen. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, & C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (S. 55-70). Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Langnickel, M., & Schadeck, M. (2010). Virtuelle Methoden zur Bewertung und Funktionsentwicklung von Fahrerbeobachtungssystemen. In *Erprobung und Simulation in der Fahrzeugentwicklung. Mess- und Versuchstechnik*. Baden-Baden. 16.-17.11. (S. 373-392). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Laschinsky, Y., Neumann-Cosel, K. von, Gonter, M., Wegwerth, C., Dubitzky, R., & Knoll, A. (2010). Evaluation of an active safety light using Virtual Test Drive within Vehicle in the Loop. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology*. Vi a del Mar, Chile. 14.-17.03., 1119-1112.
- Lee, H. C. (2003). The Validity of Driving Simulator to Measure On-Road Driving Performance of Older Drivers. *Transport Engineering in Australia*, 8(2), 89-100.
- Lee, J. D., McGehee, D. V., Brown, T. L., & Reyes, M. L. (2002). Collision Warning Timing, Driver Distraction, and Driver Response to Imminent Rear-End Collisions in a High-Fidelity Driving Simulator. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 44(2), 314-334.
- Lehrstuhl für Mechatronik in Maschinenbau und Fahrzeugtechnik. (2011). *Sitzkiste*. URL: http://www.mv.uni-kl.de/fileadmin/mec/Bilder/Sitzkiste_2.JPG, Zugriff am: 22.03.2015.
- Lehsing, C., Bengler, K., Busch, F., & Schendzielorz, T. (2013). UR:BAN - the German research initiative for user centered driver assistance. *mobil TUM*. München. 18.-19.06.
- Lesemann, M., Zlocki, A., Isasi, L., Aparicio, Andrés, Jacobson, Jan, Eriksson, H., Bruzelius, F., & Nordström, L. (2011). *Testing and Evaluation Methods for ICT-based*

- Safety Systems: Final Report*. URL: <http://www.evaluate-project.eu/pdf/evaluate-101231-d52-v10-final.pdf>, Zugriff am: 24.06.2015.
- Li, J., Zhao, X., Xu, S., Ma, J., & Rong, J. (2013). The Study of driving simulator validation for physiological signal measures. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 96, 2572-2583.
- Liang-kuang Chen, & Ulsoy, A. G. (2002). Experimental validation of a robust steering assist controller on a driving simulator. In *Proceedings of American Control Conference*. Anchorage, USA. 07.-12.05., 2528-2533.
- Ludanek, H., Sundermeies, R., & Wolff, H. (2010). Virtuelle Erprobungs- und Testverfahren im Abgleich zur Realität: Erhöhung des Nutzens durch Erlebbarkeit der Simulationsergebnisse. In *Erprobung und Simulation in der Fahrzeugentwicklung. Mess- und Versuchstechnik*. Baden-Baden. 16.-17.11. (S. 3-15). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Maag, C., Mühlbacher, D., Mark, C., & Krüger, H.-P. (2012). Studying effects of advanced driver assistance systems (ADAS) on individual and group level using multi-driver simulation. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 4(3), 45-54.
- Manstetten, D., Bengler, K., Busch, F., Färber, B., Lehsing, C., Neukum, A., & Schendzielorz, T. (2013). "UR:BAN MV" - a German project focusing on human factors to increase traffic safety in urban areas. *20th ITS World Congress*. Tokyo, Japan. 14.-18.10.
- Maurer, M. (2012). Entwurf und Test von Fahrerassistenzsystemen. In H. Winner, S. Hakuli, & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S. 43-54). Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag.
- Maurer, M. (2013). Automotive systems engineering: A personal perspective. In M. Maurer & H. Winner (Hrsg.), *Automotive Systems Engineering* (S. 17-35). Berlin, Heidelberg: Springer.
- McAvoy, D. S., Schattler, K. L., & Datta, T. K. (2007). Driving simulator validation for nighttime construction work zone devices. *Transportation Research Record*, 2015, 55-63.
- McConnell, D. (2004). *Integrated systems make driving safer*. URL: <http://eetimes.com/design/automotive-design/4010997/Integrated-Systems-Make-Driving-Safer>, Zugriff am: 19.03.2015.
- McGehee, D. V., Mazzae, E. N., & Baldwin, S. G. (2000). Driver reaction time in crash avoidance research: Validation of a driving simulator study on test track. In *Proceedings of the Iea2000/hfes 2000 Congress*. San Diego, USA. 29.07.-04.08., 320-323.
- Meuleners, L., & Fraser, M. (2015). A validation study of driving errors using a driving simulator. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behavior*, 29, 14-21.
- Mühlbacher, D. (2013). Die Pulksimulation als Methode zur Untersuchung verkehrpsychologischer Fragestellungen. *Human Factors-Kolloquium des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt*, Braunschweig, 16.04.
- 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 (Hrsg.), *Handbook of driving simulation for engineering, medicine, and psychology*. (S. 13-1-13-18). Boca Raton: Taylor & Francis Group.

- Muttart, J. W. (2005). *Factors that Influence Drivers' Response Choice Decisions in Video Recorded Crashes*. Warrendale, USA: SAE International.
- National Highway Traffic Safety Administration. (2013). *Preliminary Statement of Policy Concerning Automated Vehicles*. NHTSA Website, URL: http://www.nhtsa.gov/staticfiles/rulemaking/pdf/Automated_Vehicles_Policy.pdf, Zugriff am: 20.02.2015.
- Naujoks, F., Grattenthaler, H., & Neukum, A. (2012). Zeitliche Gestaltung effektiver Fahrerinformationen zur Kollisionsvermeidung auf Basis kooperativer Perzeption. In K. Dietmayer (Hrsg.), *8. Workshop Fahrerassistenzsysteme*. Walting im Altmühltal. 26.-28.09. (S. 141-150). Darmstadt: Uni-DAS.
- NcLeod, R. W., & Ross, H. E. (1983). Opreic-flow and cognitive factors in time-to-collision estimates. *Perception*, *12*, 417-423.
- Neale, V. L., Dingus, T. A., Klauer, S. G., Sudweeks, J., & Goodman, M. (2005). *An overview of the 100-car naturalistic driving study and findings*. URL: http://www.nhtsa.gov/DOT/NHTSA/NRD/Multimedia/PDFs/Crash%20Avoidance/Driver%20Distraction/100Car_ESV05summary.pdf, Zugriff am: 16.03.2015.
- Negele, H. J. (2007). *Anwendungsgerechte Konzipierung von Fahr simulatoren für die Fahrzeugentwicklung* (Dissertation). Technische Universität, München.
- Neukum, A., & Krüger, H.-P. (2003). Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen - Untersuchungsmethoden und Bewertungskriterien. In *Reifen, Fahrwerk, Fahrbahn*. Hannover. 29.-30.10. (S. 297-318). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Neukum, A., Lübbecke, T., Krüger, H.-P., Mayser, C., & Steinle, J. (2008). ACC-Stop&Go: Fahrerverhalten an funktionalen Systemgrenzen. In M. Maurer & C. Stiller (Hrsg.), *5. Workshop Fahrerassistenzsysteme*. Walting im Altmühltal. 02.-04.04. (S. 141-150). Darmstadt: Uni-DAS.
- Neukum, A., Mehrjerdian, E., Greul, R., & Gaedke, A. (2010). Einflussfaktor Fahrzeug - Zur Übertragbarkeit von Aussagen über die Wirkung von Zusatzlenkmomenten. In *Fahrerassistenz und integrierte Sicherheit*. 26. VDI/VW-Gemeinschaftstagung. Wolfsburg. 06.-07.10. (S. 361-374). Düsseldorf: VDI Verlag.
- 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*. Walting im Altmühltal. 26.-28.03. (S. 115-125). Darmstadt: Uni-DAS.
- Neukum, A., Pauling, J., Frömmig, L., & Henze, R. (2010). *Untersuchung zur Wahrnehmung von Lenkmomenten bei PKW*. FAT Schriftenreihe: Vol. 222. Berlin: Forschungsvereinigung Automobiltechnik.
- Neukum, A., & Reinelt, W. (2005). Bewertung der Funktionssicherheit aktiver Lenksysteme: ein Human Factors Ansatz. In *Fahrer im 21. Jahrhundert. Der Mensch als Fahrer und seine Interaktion mit dem Fahrzeug*. Braunschweig. 22.-23.11. (S. 161-176). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Neukum, A., Schmidt, E., Westhoff, D., Huesmann, A., Muhrer, E., Schramm, S., & Rüter, F. (2013). *UR: BAN MV KON - Systematik und Status quo der Methodik: Bericht zum Arbeitspaket 1000* (unveröffentlichter Bericht). Würzburg.
- Neukum, A., Ufer, E., Pauling, J., & Krüger, H.-P. (2008). Controllability of superposition steering system failures. *steering.tech 2008*. München. 31.03.-01.04.

- 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. 04.-06.02.
- Niederée, U., & Vollrath, M. (2009). Systemausfälle bei Längsführungsassistenten - Sind bessere Systeme schlechter? 8. *Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme: "Der Mensch im Mittelpunkt technischer Systeme"*. Berlin. 07.-09.10.
- Nilsson, L., & Alm, H. (1991). *PROMETHEUS MMI checklist*: PROMETHEUS Working Group 4.
- NVIS Inc. (2009). *nVisor ST50 Head Mounted Display: Produktdatenblatt*. URL: <http://www.senztech.cc/UploadFiles/20121108040547.pdf>, Zugriff am: 21.03.2015.
- NVIS Inc. (2009). *nVisor SX 111 Head Mounted Display: Produktdatenblatt*. URL: <http://www.virtalis.com/files/product-brochures/sx111.pdf>, Zugriff am: 21.03.2015.
- Oestreich, M., & Romberg, O. (2012). *Keine Panik vor Statistik!: Erfolg und Spaß im Horrorfach nichttechnischer Studiengänge (4., Aufl.)*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.
- Olaverri-Monreal, C., Lehsing, C., Trubswetter, N., Schepp, C. A., & Bengler, K. (2013). In-vehicle displays: Driving information prioritization and visualization. In *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Gold Coast City, Australien. 23.-26.06., 660-665.
- Ovcharova, N., Fausten, M., & Gauterin, F. (2012). Effectiveness of forward collision warnings for different driver attention states. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Alcalá de Henares, Spanien. 03.-07.06.
- Panerai, F., Droulez, J., Kelada, J.-M., Kemeny, A., Balligand, E., & Favre, B. (2001). Speed and safety distance control in truck driving: Comparison of simulation and real-world environment. *Driving Simulator Conference*. Sophia Anipolis, Frankreich. 05.-07.09.
- Philip, P., Sagaspe, P., Taillard, J., Valtat, C., Moore, N., & Akerstedt, T. (2005). Fatigue, sleepiness and performance in simulated versus real driving conditions. *Sleep*, 28, 1511-1516.
- Piao, J., & McDonald, M. (2003). Low speed car following behaviour from floating vehicle data. In *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Columbus, USA. 09.-11.06., 462-467.
- Pohl, J., Birk, W., & Westervall, L. (2007). A driver-distraction-based lane-keeping assistance system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 221(4), 541-552.
- Popken, A. (2009). *Driver's reliance on lane keeping assistance systems as a function of the level of assistance* (Dissertation). Technische Universität, Chemnitz.
- Pundlik S., Peli E., & Luo G. (2011). Time to collision and collision risk estimation from local scale and motion. *7th International Symposium on Visual Computing*. Las Vegas, USA. 26.-28.09.
- Purucker, C. (2013). *Urbanes Fahren - Systematik der Assistenzszenarien* (Unveröffentlichter Bericht). Würzburg.
- 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. In N. Stanton, G. Di Bucchianco, A. Vallicelli, &

- S. Landry (Hrsg.), *Advances in Human Aspects of Transportation. Proceedings of the 5th AHFE Conference*. Krakau, Polen. 19.-23.07., 421-430.
- Pütz, A., Josten, J., Eckstein, L., & Zlocki, A. (2014). UR:BAN: controllability evaluation of system interventions of evading assistance. *23rd Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology*. Aachen. 06.-08.10.
- Pütz, A., Josten, J., Zlocki, A., & Eckstein, L. (2014). Driving situation influence in the controllability assessment. *21st ITS World Congress*. Detroit, USA. 07.-11.09.
- Pütz, A., Zlocki, A., & Eckstein, L. (2014). Driver reaction to system initiated evasive manoeuvres. *10th ITS European Congress*. Helsinki, Finland. 16.-19.06.
- Pyne, H. C., Dougherty, M. S., Carsten, O., & Tight, M. R. (1995). *A simulator based evaluation of speed reduction measures for rural arterial roads: Working Paper 434*.
- Ranney, T. A. (2011). Psychological fidelity: Perception of risk. In D. L. Fisher, M. Rizzo, J. K. Caird, & J. D. Lee (Hrsg.), *Handbook of driving simulation for engineering, medicine, and psychology* (S. 9-1 - 9-13). Boca Raton: Taylor & Francis Group.
- Rasmussen, J. (1983). Skills, rules and knowledge; Signals, signs and symbols and other distinctions in human performance models. *Proceedings of the IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, SMC-13*(3), 257-266.
- Reichel, M. (2013). *Situationsanalyse für fortschrittliche Fahrerassistenzsysteme* (Dissertation). Technische Universität Carolo-Wilhelmina, Braunschweig.
- Reif, K. (2010). *Fahrstabilisierungssysteme und Fahrerassistenzsysteme*. Bosch Fachinformation Automobil. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag.
- Reimer, B., D'Ambrosio, L. A., Coughlin, J. F., Kafritsen, M. E., & Biedermann, J. (2006). Using self-reported data to assess the validity of driving simulation. *Behavior Research Methods, 38*(2), 314-324.
- Reinelt, W., & Lundquist, C. (2006). *Controllability of Active Steering System Hazards: From Standards to Driving Tests*. Warrendale, PA: SAE International.
- RESPONSE Consortium. (2009). *Code of practice for the design and evaluation of ADAS (V5.0): RESPONSE 3: a PReVENT Project*.
- Reymond, G., Kemeny, A., Droulez, J., & Berthoz, A. (2001). Role of Lateral Acceleration in Curve Driving: Driver Model and Experiments on a Real Vehicle and a Driving Simulator. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, 43*(3), 483-495.
- Riedl, B., & Färber, B. (2015). Evaluation of a new projection concept for the Vehicle in the Loop (VIL) driving simulator. *Driving Simulation Conference 2015*. Tübingen. 16.-18.09.
- Riemersma, J. B., van der Horst, R., Hoekstra, W., Alink, G. M. M., & Otten, N. (1990). The validity of a driving simulator in evaluating speed-reducing measures. *Traffic Engineering and Control, 31*, 416-420.
- Risto, M., & Martens, M. H. (2014). Driver headway choice: A comparison between driving simulator and real-road driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behavior, 25*, 1-9.
- Rudin-Brown, C. M., Williamson, A., & Lenné, M. G. (2009). *Can driving simulation be used to predict changes in real-world crash risk?* Monash University Website,

- URL: <http://monash.edu/miri/research/reports/muarc299.html>, Zugriff am: 24.06.2015.
- 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.), *9. Workshop Fahrerassistenzsysteme*. Waiting im Altmühltal. 26.-28.03. (S. 137-146). Darmstadt: Uni-DAS.
- Ryu, J., Hashimoto, N., & Sato, M. (2005). Influence of resolution degradation on distance estimation in virtual space displaying static and dynamic image. *International Conference on Cyberworlds (CW'05)*. Singapur. 23.-25.11.
- Sandblom, F., & Brannstrom, M. (2011). Probabilistic threat assessment and driver modeling in collision avoidance systems. In *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Baden-Baden, 914-919.
- Schick, B., Büttner, R., Baltruschat, K., Meier, G., & Jakob, H. (2007). Bewertung der Funktion und Güte von Fahrerassistenzsystemen bei aktivem Bremsengriff. *ATZ*, 109(05/2007), 414-425.
- Schlender, D. (2008). Simulatorkrankheit in Fahrsimulatoren. *Zeitschrift für Verkehrssicherheit*, 54(2), 74-80.
- Schmidt, G. (2008). Applying the response code of practice for evaluation of driver assistance systems: how the age of the driver influences perception of steering torque signals. In C. Brusque (Hrsg.), *Proceedings of the European Conference on Human Centred Design for Intelligent Transportation Systems*. Lyon, Frankreich. 03.-04.04. 229-237.
- Schmidt, G. (2008). Applying the RESPONSE Code of Practice for evaluation of driver assistance systems: driver age and perception of steering torque signals. *IET Intelligent Transport Systems*, 2(4), 276.
- Schmidt, G. (2009). *Haptische Signale in der Lenkung: Controllability zusätzlicher Lenkmomente* (Dissertation). Technische Universität Carolo-Wilhelmina, Braunschweig.
- Schmitt, J., Breu, A., Maurer, M., & Färber, B. (2007). Simulation des Bremsverhaltens in Gefahrensituationen mittels experimentell validiertem Fahrermodell. In *Fahrer im 21. Jahrhundert. Human Machine Interface*. Braunschweig. 14.-15.11. (S. 75-89). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Schmitt, J., Färber, B., Maurer, M., & Breu, A. (2006). Menschliches und technisches Verhalten an den Systemgrenzen eines FAS. In *Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme*. Wolfsburg. 12.-13.10 (S. 563-579). Düsseldorf: VDI Verlag.
- Scholz, S., Wagemann, T., Hohm, A., Lattke, B., Simm, N., Siedersberger, K.-H., & Siegel, A. (2013). *Kollisionsvermeidung durch Ausweichen und Bremsen (KAB): AP 1000 Spezifikation* (unveröffentlichter Arbeitsbericht). Wolfsburg.
- Schömig, Nadja, Schoch, S., & Neukum, A. (2015). *Simulatorstudien zur Ablenkungswirkung fahrfremder Tätigkeiten. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen: M, Mensch und Sicherheit: Vol. 253*. Bremen: Fachverlag NW.
- Schöner, H.-P., & Morys, B. (2015). Dynamische Fahrsimulatoren. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, & C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (S. 139-154). Wiesbaden: Springer Fachmedien.

- Schwarz, J. (2006). Response 3 - Code of Practice for development, validation and market introduction of advanced driver assistance systems. In *Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme*. Wolfsburg. 12.-13.10 (S. 465-472). Düsseldorf: VDI Verlag.
- Seeck, A., & Gasser, T. M. (2006). Reichweite und Angemessenheit der Haftungssituation bei Fahrerassistenz. In *Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme*. Wolfsburg. 12.-13.10 (S. 487-497). Düsseldorf: VDI Verlag.
- Shanmugaratnam, S., Kass, S. J., & Arruda, J. E. (2010). Age differences in cognitive and psychomotor abilities and simulated driving. *Accident Analysis & Prevention*, 42, 802-808.
- Shinar, D., & Ronen, A. (2007). Validation of speed perception and production in a single screen simulator. *Advances in Transportation Studies, Special Issue*, 51-56.
- Shutko, J. (1999). *An Investigation of Collision Avoidance Warnings on Brake Response Times of Commercial Motor Vehicle Drivers* (Masterarbeit). Virginia State University, Blacksburg, USA.
- Sieber, M., Berg, G., Karl, I., Siedersberger, K.-H., Siegel, A., & Färber, B. (2013). Validation of driving behavior in the Vehicle in the Loop: Steering responses in critical situations. In *Proceedings of the 16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems - (ITSC 2013)*. Den Haag, Niederlande. 09.-13.10., 1101-1106.
- Slovic, P., Fischhoff, B., Lichtenstein, S., & Roe, F. J. C. (1981). Perceived risk: Psychological factors and social implications [and discussion]. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 376(1764), 17-34.
- Sommer, F., & Engeln, A. (2009). Fahrerabsichtserkennung für autonome Notbremssysteme - Ein Untersuchungsansatz. In H. Winner & R. Bruder (Hrsg.), *Wie realitätsnah lässt sich Fahrverhalten messen? Neue Methoden und Werkzeuge*. Darmstadt. 18.-19.03. (S. 17-28). Stuttgart: Ergonomia.
- Starke, A., & Hänsel, F. (2011). Vehicle in the Loop - Fahrerassistenzsysteme mit Virtual Reality im realen Fahrzeug testen, entwickeln und erleben. *12. Braunschweiger Symposium AAET 2011*. Braunschweig. 09.-10.02.
- Stevens, A. & Cynk, S. (2011). *Checklist for the assessment of in-Vehicle information systems*. URL: <http://www.umich.edu/~driving/documents/MIS005TRLChecklist2011.pdf>, Zugriff am: 24.06.2015.
- Strasser, B. (2012). *Vernetzung von Test- und Simulationsmethoden für die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen* (1. Aufl.). Audi-Dissertationsreihe: Vol. 69. Göttingen: Cuvillier.
- Strasser, B., Siegel, A., Siedersberger, K.-H., & Bubb, H. (2010). Vernetzung von Test- und Simulationsmethoden für die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen (FAS). *4. Tagung Sicherheit durch Fahrerassistenz*. München. 15.-16.04.
- Tapani, A. (2007). *Analysis of system effects of driver assistance systems by traffic simulation*. URL: <http://www.ectri.org/YRS07/Papiers/Session-5/Tapani.pdf>, Zugriff am: 24.06.2015.
- Terumitsu, H., Tetsuo, Y., & Tsuyoshi, T. (2007). Development of the driving simulation system MOVIC-T4 and its validation using field driving data. *Tsinghua Science and Technology*, 12(2), 141-150.

- Tönert, L., Farid, M., Schneller, R., & Bengler, K. (2011). Wahrnehmungs- und Verhaltensleistung des Fahrers bei einer Fahrzeug-Abdrift mit teil-automatisierter Querführung in unterschiedlich kritischen Fahrsituationen: Methodischer Ansatz für die Absicherung der Beherrschbarkeit hochautomatisierter Systeme. In *Der Fahrer im 21. Jahrhundert Fahrer, Fahrerunterstützung und Bedienbarkeit*. Braunschweig. 08.-09.11. (S. 155-168). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Törnros, J. (1998). Driving behavior in a real and a simulated road tunnel - a validation study. *Accident Analysis & Prevention*, 30(4), 497-503.
- Unsel, T., Breuer, J., & Eckstein, L. (2004). Fußgängerschutz durch Bremsassistentz. *1. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistentz*. München. 04.-05.04.
- Unsel, T., Mayer, C., Chin, E., Aparicio, Andrés, Jacobson, Jan, Munos, O., Ranovona, M., & Winkler, B. (2011). Assessment of behavioral aspects in integrated safety systems. *22nd Enhanced Safety of Vehicles*. Washington D.C., USA. 13.-16.06.
- UR:BAN, Teilprojekt VV. (2012). *Kooperative Infrastruktur (KI)*. URL: <http://urban-online.org/de/vernetztes-verkehrssystem/kooperative-infrastruktur/index.html>, Zugriff am: 24.06.2015.
- UR:BAN, Teilprojekt VV. (2012). *Smarte Kreuzung (SK)*. URL: <http://urban-online.org/de/vernetztes-verkehrssystem/smarte-kreuzung/index.html>, Zugriff am: 24.06.2015.
- UR:BAN, Teilprojekt VV. (2014). *Grüne-Welle-Assistent*. URL: http://www.urban-online.org/cms/upload/download/allgemein/Halbzeitpraesentation_2014-05-14/Demonstratoren_Projekt_Vernetzes_Verkehrssystem/VV-US_BMW.pdf, Zugriff am: 24.06.2015.
- van Arem, B., van Driel, Cornelia J. G., & Visser, R. (2006). The impact of cooperative adaptive cruise control on traffic-flow characteristics. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 7(4), 429-436.
- van der Horst, R. (1996). Speed-reducing measures for 80 km/h roads. In R. Risser & T. Jonsson (Hrsg.), *Proceedings of the 9th workshop of ICTCT*. Zagreb, Kroatien.
- Vision Zero Initiative. (2011). URL: <http://www.visionzeroinitiative.com>, Zugriff am: 26.02.2015.
- Vollrath, M., & Krems, J. (2011). *Verkehrspsychologie: Ein Lehrbuch für Psychologen, Ingenieure und Informatiker. Standards Psychologie*. Stuttgart: Kohlhammer.
- Wade, M. G. & Hammond, C. (1998). *Simulator validation: Evaluating driver performance in simulation and the real world*. URL: conservancy.umn.edu/bitstream/handle/11299/155092/Mn-DOT1998-28.pdf, Zugriff am: 24.06.2015.
- Wang, S., Hesse, B., Brandt, T., & Schramm, D. (2011). Kooperative Bahnführung mit Car-to-X-Kommunikation. *ATZ*, 113(04/2011), 324-329.
- Weber, D., Marberger, C., Henn, R. W., Uler, W., Hoffmann, S., & Gauterin, F. (2010). Untersuchung des Fahrerverhaltens auf visuelle Ausweichanzeigen im kontaktanalogen Head-Up-Display. In *Fahrerassistentz und integrierte Sicherheit*. 26. VDI/VW-Gemeinschaftstagung. Wolfsburg. 06.-07.10. (S. 247-260). Düsseldorf: VDI Verlag.
- Weinberger, M. (2001). Adaptive cruise control field operational test- the learning phase. *JSAE Review*, 22(4), 487-494.

- Weitzel, A. (2013). Objective controllability assessment for unintended ADAS reactions. In M. Maurer & H. Winner (Hrsg.), *Automotive Systems Engineering* (S. 135-145). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Weitzel, A. (2013). *Objektive Bewertung der Kontrollierbarkeit nicht situationsgerechter Reaktionen umfeldsensorbasierter Fahrerassistenzsysteme* (Dissertation). Technische Universität, Darmstadt.
- Weitzel, A., & Winner, H. (2012). Ansatz zur Kontrollierbarkeitsbewertung von Fahrerassistenzsystemen vor dem Hintergrund der ISO 26262. In K. Dietmayer (Hrsg.), *8. Workshop Fahrerassistenzsysteme*. Walting im Altmühltal. 26.-28.09. (S. 15-26). Darmstadt: Uni-DAS.
- Wiener Übereinkommen über den Straßenverkehr (1968). WÜ. Verfügbar unter <http://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/19680244/201302150000/0.741.10.pdf>, Zugriff am: 24.06.2015.
- Willemsen, D., Stuiver, A., & Hogema, J. (2014). Transition of control: Automation giving back control to the driver. In N. Stanton, G. Di Bucchianco, A. Vallicelli, & S. Landry (Hrsg.), *Advances in Human Aspects of Transportation. Proceedings of the 5th AHFE Conference*. Krakau, Polen. 19.-23.07., 451-459.
- Winer, B. J. (1962). Latin squares and related designs. In B. J. Winer (Hrsg.), *Statistical principles in experimental design* (S. 514-577). New York: McGraw-Hill Book Company.
- Winner, H. (2012). Frontkollisionsschutzsysteme. In H. Winner, S. Hakuli, & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S. 522-542). Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag.
- Winner, H. (2013). Challenges of automotive systems engineering for industry and academia. In M. Maurer & H. Winner (Hrsg.), *Automotive Systems Engineering* (S. 3-15). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Winner, H. (2015). Grundlagen von Frontkollisionsschutzsystemen. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, & C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (S. 893-912). Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Winner, H., Barthenheier, T., Fecher, N., & Luh, S. (2003). Fahrversuche mit Probanden zur Funktionsbewertung von aktuellen und zukünftigen Fahrerassistenzsystemen. In K. Landau & H. Winner (Hrsg.), *Fahrversuche mit Probanden - Nutzwert und Risiko. Darmstädter Kolloquium Mensch & Fahrzeug, Technische Universität Darmstadt*. Darmstadt. 03.-04.04. (S. 1-25). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Winner, H., & Wolf, G. (2012). Quo vadis, FAS? In H. Winner, S. Hakuli, & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S. 664-673). Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag.
- Winter, J. de. (2013). Using the student's t-test with extremely small sample sizes. *Practical Assessment, Research & Evaluation*, 18(10), 1-12.
- Winter, J. de, van Leeuwen, P. M., & Happee, R. (2012). Advantages and disadvantages of driving simulators: A discussion. *Measuring Behavior 2012*. Utrecht, Niederlande. 28-31.08.
- Winterhagen, J. (1999). Fahrerassistenzsysteme für Nutzfahrzeuge. *ATZ*, 101(10/1999), 820-821.

- WIVW. (2014). *Fahrsimulation und SILAB*. URL: <https://wivw.de/de/silab>, Zugriff am: 21.03.2015.
- Wu, J.-R., & Ouhyoung, M. (2000). On latency compensation and its effects on head-motion trajectories in virtual environments. *The Visual Computer*, 16, 79-90.
- Yagar, S., & van Aerde, M. (1983). Geometric and environmental effects on speeds of 2-lane highways. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 17A(4), 315-325.
- Yan, X., Abdel-Aty, M., Radwan, E., Wang, X., & Chilakapati, P. (2008). Validating a driving simulator using surrogate safety measures. *Accident Analysis & Prevention*, 40, 274-288.
- Zlocki, A., Benminoun, M., Lesemann, M., & Lützow, J. (2008). EU-Projekt eVALUE - Entwicklung von Test- und Evaluierungsmethoden für präventive Sicherheitssysteme. *Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme*. 24. VDI/VW Gemeinschaftstagung. Wolfsburg. 29.-30.10.
- Zöllner, I., Diedrich, C., Abendroth, B., & Bruder, R. (2013). Fahrsimulatorvalidität - Systematisierung und quantitative Analyse bisheriger Forschungen. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 67(04/2013), 197-206.
- Zöllner, I., Mautes, N., Ren, W., & Abendroth, B. (2015). Wissenssammlung für valide Fahrsimulation. *ATZ*, 117(03/2015), 70-73.

Eigene Publikationen

- 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.
- 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. In N. Stanton, G. Di Bucchianco, A. Vallicelli, & S. Landry (Hrsg.), *Advances in Human Aspects of Transportation. Proceedings of the 5th AHFE Conference*. Krakau, Polen. 19.-23.07., 421-430.
- 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.), *9. Workshop Fahrerassistenzsysteme. Walting im Altmühltal*. 26.-28.03. (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 - (ITSC 2015)*, Las Palmas, Spanien. 15.-18.09.
- Rüger, F., Sieber, M., Siegel, A., Siedersberger, K.-H., & Färber, B. (2015). Fahrerreaktionen auf Eingriffe von Ausweichassistenz-Systemen bei belegtem Gegenfahrstreifen. 8. *VDI Fachtagung: Der Fahrer im 21. Jahrhundert*. Braunschweig. 10.-11.11.
- Rüger, F., Sieber, M., Siegel, A., Siedersberger, K.-H., & Färber, B. (2015). Kontrollierbarkeitsbewertung von FAS der aktiven Sicherheit in frühen Phasen des Entwicklungsprozesses mit dem Vehicle in the Loop (VIL). In C. Stiller (Hrsg.), *10. Workshop Fahrerassistenzsysteme. Walting im Altmühltal*. 28.-30.09. (S. 149-159). Darmstadt: Uni-DAS.

Betreute Studentische Arbeiten

- Berthold, T. (2011). *Ermittlung von Wahrnehmungszeiten bei einem 3D-Kombigerät mittels Face-Lab* (Projektarbeit). Universität der Bundeswehr, Neubiberg.
- Bobojonov, H. (2013). *Vergleich verschiedener Headtracking-Konzepte für das Vehicle in the Loop* (Bachelorarbeit). Universität der Bundeswehr, Neubiberg.
- Chahin, A. (2013). *Kontrollierbarkeit von Notbremssystemen im höheren Geschwindigkeitsbereich* (Masterarbeit). Universität der Bundeswehr, Neubiberg.
- Chastellier, J. (2013). *Entwurf von Richtlinien zur Gewährleistung von Kontrollierbarkeit moderner Fahrerassistenzsysteme* (Masterarbeit). Universität der Bundeswehr, Neubiberg.
- Durbise, J. (2013). *Vergleich verschiedener HMD-Konfigurationen im Vehicle in the Loop*. Projektarbeit). Universität der Bundeswehr, Neubiberg.
- Durbise, J. (2013). *Wahrnehmung von Abständen und Zeitlücken im Vehicle in the Loop* (Masterarbeit). Universität der Bundeswehr, Neubiberg.
- Grico, A. & Wolf, C. (2015). *Erstellen einer urbanen virtuellen Welt im Road Designer von Virtual Test Drive für die UR:BAN Abschlusspräsentation* (Studienarbeit). Universität der Bundeswehr, Neubiberg.
- Herrmann, S. (2013). *Implementierung urbaner Verkehrsszenarien für das Vehicle in the Loop* (Bachelorarbeit). Universität der Bundeswehr, Neubiberg.
- Hilbig, L. (2012). *Evaluierung eines 3D-Kombigerätes in Anbetracht von Wahrnehmungszeiten, Akzeptanz und Joy of Use* (Bachelorarbeit). Universität der Bundeswehr, Neubiberg.
- Konertz, T.-D. (2013). *Vehicle in the Loop - Validierung als Prüfumgebung für querdynamische Fahrerassistenzsysteme in UR:BAN* (Masterarbeit). Universität der Bundeswehr, Neubiberg.
- Maul, K. (2013). *Validierung eines Notbremsassistentensystems im Geschwindigkeitsbereich bis 80 km/h* (Bachelorarbeit). Universität der Bundeswehr, Neubiberg.
- Maul, K. (2013). *Vehicle in the Loop - Prüfumgebung zur Untersuchung von Ausweichassistentensystemen* (Masterarbeit). Universität der Bundeswehr, Neubiberg.
- Mayer, R. & Konertz, T.-D. (2013). *Erstellen einer urbanen virtuellen Welt im Road Designer von Virtual Test Drive im Rahmen des UR:BAN Projektes* (Projektarbeit). Universität der Bundeswehr, Neubiberg.
- Petrenko, R. (2013). *Validierung des Vehicle in the Loop als Prüfumgebung für längsdynamische Verkehrsszenarien* (Masterarbeit). Universität der Bundeswehr, Neubiberg.
- Plattner, N. (2013). *Wirksamkeit und Kontrollierbarkeit von Ausweichassistentensystemen mit nicht entkoppelter Lenkung* (Masterarbeit). Universität der Bundeswehr, Neubiberg.
- Schroppe, F. (2013). *Entwurf einer urbanen virtuellen Welt als Teststrecke für einen Ausweichassistenten* (Projektarbeit). Universität der Bundeswehr, Neubiberg.

Schroppe, F. (2014). *Reaktion auf autonome Lenkeingriffe aus Sicht des Gegenverkehrs - Untersuchung von Kontrollierbarkeit mit dem Vehicle in the Loop* (Masterarbeit). Universität der Bundeswehr, Neubiberg.

Schuckardt, C. (2014). *Entwicklung und Bewertung eines Trainingskonzeptes und Wirkung verschiedener Ausweichtrajektorien entgegenkommender Fahrzeuge im Vehicle in the Loop* (Bachelorarbeit). Universität der Bundeswehr, Neubiberg.

Schuckardt, C. (2014). *Weiterentwicklung der visuellen Darstellung im Vehicle in the Loop durch Implementierung eines Beamers* (Projektarbeit). Universität der Bundeswehr, Neubiberg.

Schuckardt, C. (2015). *Empirische Evaluation zur Weiterentwicklung des „Vehicle in the Loop“ mit Beamer-Visualisierung* (Masterarbeit). Universität der Bundeswehr, Neubiberg.

Anhang

A Versuchspläne

Tabelle 16: Versuchsplan zur Ermittlung von KON-Parametern

VP	1.	RF	2.	RF	3.	RF	4.	RF	5.	RF	6.	RF
1	ZH	1	ZB	2	TTC	3	FBFV	1	GB	1	QV	1
2	BV	4	GB	3	ZH	2	ZB	3	TTC	1	QV	2
3	GB	3	ZH	3	ZB	1	TTC	2	BV	1	QV	3
4	ZB	1	TTC	2	ZH	3	BV	4	GB	1	QV	1
5	BV	1	GB	2	ZB	2	TTC	3	ZH	1	QV	2
6	GB	3	ZB	3	TTC	1	ZH	2	BV	4	QV	3
7	TTC	1	ZH	2	ZB	3	BV	1	GB	1	QV	1
8	BV	4	GB	2	TTC	2	ZH	3	ZB	1	QV	2
9	GB	3	TTC	3	ZH	1	ZB	2	BV	1	QV	3
10	ZH	2	ZB	3	TTC	1	BV	4	GB	1	QV	1
11	BV	2	GB	2	ZH	3	ZB	1	TTC	2	QV	2
12	GB	3	ZH	1	ZB	2	TTC	3	BV	5	QV	3
13	ZB	2	TTC	3	ZH	1	BV	2	GB	1	QV	1
14	BV	5	GB	2	ZB	3	TTC	1	ZH	2	QV	2
15	GB	3	ZB	1	TTC	2	ZH	3	BV	2	QV	3
16	TTC	2	ZH	3	ZB	1	BV	5	GB	1	QV	1
17	BV	2	GB	2	TTC	3	ZH	1	ZB	2	QV	2
18	GB	3	TTC	1	ZH	2	ZB	3	BV	5	QV	3
19	ZH	3	ZB	1	TTC	2	BV	2	GB	1	QV	1
20	BV	5	GB	2	ZH	1	ZB	2	TTC	3	QV	2
21	GB	3	ZH	2	ZB	3	TTC	1	BV	3	QV	3
22	ZB	3	TTC	1	ZH	2	BV	6	GB	1	QV	1
23	BV	3	GB	2	ZB	1	TTC	2	ZH	3	QV	2
24	GB	3	ZB	2	TTC	3	ZH	1	BV	6	QV	3
25	TTC	3	ZH	1	ZB	2	BV	3	GB	1	QV	1
26	BV	6	GB	2	TTC	1	ZH	2	ZB	3	QV	2
27	GB	3	TTC	2	ZH	3	ZB	1	BV	3	QV	3
28	ZH	1	ZB	2	TTC	3	BV	6	GB	1	QV	1
29	BV	3	GB	2	ZB	1	TTC	2	ZH	3	QV	2

30	GB	3	TTC	1	ZH	2	ZB	3	BV	6	QV	3
----	----	---	-----	---	----	---	----	---	----	---	----	---

Tabelle 17: Versuchsplan für Testfall 1

VP	Erstes Manöver	Zweites Manöver	Drittes Manöver	Parameter-Set
1	Rechtsabbieger1	Spielendes Kind1	Falschauslösung1	1
2	Rechtsabbieger1	Falschauslösung1	Spielendes Kind1	1
3	Rechtsabbieger1	Spielendes Kind1	Falschauslösung1	1
4	Rechtsabbieger1	Falschauslösung1	Spielendes Kind1	1
5	Rechtsabbieger2	Spielendes Kind2	Falschauslösung2	2
6	Rechtsabbieger2	Falschauslösung2	Spielendes Kind2	2
7	Rechtsabbieger2	Spielendes Kind2	Falschauslösung2	2
8	Rechtsabbieger2	Falschauslösung2	Spielendes Kind2	2
9	Rechtsabbieger3	Spielendes Kind3	Falschauslösung3	3
10	Rechtsabbieger3	Falschauslösung3	Spielendes Kind3	3
11	Rechtsabbieger3	Spielendes Kind3	Falschauslösung3	3
12	Rechtsabbieger3	Falschauslösung3	Spielendes Kind3	3
13	Rechtsabbieger4	Spielendes Kind4	Falschauslösung4	4
14	Rechtsabbieger4	Falschauslösung4	Spielendes Kind4	4
15	Rechtsabbieger4	Spielendes Kind4	Falschauslösung4	4
16	Rechtsabbieger4	Falschauslösung4	Spielendes Kind4	4
17	Spielendes Kind1	Falschauslösung1	Rechtsabbieger1	1
18	Spielendes Kind1	Rechtsabbieger1	Falschauslösung1	1
19	Spielendes Kind1	Falschauslösung1	Rechtsabbieger1	1
20	Spielendes Kind1	Rechtsabbieger1	Falschauslösung1	1
21	Spielendes Kind2	Falschauslösung2	Rechtsabbieger2	2
22	Spielendes Kind2	Rechtsabbieger2	Falschauslösung2	2
23	Spielendes Kind2	Falschauslösung2	Rechtsabbieger2	2
24	Spielendes Kind2	Rechtsabbieger2	Falschauslösung2	2
25	Spielendes Kind3	Falschauslösung3	Rechtsabbieger3	3
26	Spielendes Kind3	Rechtsabbieger3	Falschauslösung3	3
27	Spielendes Kind3	Falschauslösung3	Rechtsabbieger3	3
28	Spielendes Kind3	Rechtsabbieger3	Falschauslösung3	3
29	Spielendes Kind4	Falschauslösung4	Rechtsabbieger4	4
30	Spielendes Kind4	Rechtsabbieger4	Falschauslösung4	4
31	Spielendes Kind4	Falschauslösung4	Rechtsabbieger4	4
32	Spielendes Kind4	Rechtsabbieger4	Falschauslösung4	4
33	Falschauslösung1	Rechtsabbieger1	Spielendes Kind1	1
34	Falschauslösung1	Spielendes Kind1	Rechtsabbieger1	1

35	Falschauslösung1	Rechtsabbieger1	Spielendes Kind1	1
36	Falschauslösung1	Spielendes Kind1	Rechtsabbieger1	1
37	Falschauslösung2	Rechtsabbieger2	Spielendes Kind2	2
38	Falschauslösung2	Spielendes Kind2	Rechtsabbieger2	2
39	Falschauslösung2	Rechtsabbieger2	Spielendes Kind2	2
40	Falschauslösung2	Spielendes Kind2	Rechtsabbieger2	2
41	Falschauslösung3	Rechtsabbieger3	Spielendes Kind3	3
42	Falschauslösung3	Spielendes Kind3	Rechtsabbieger3	3
43	Falschauslösung3	Rechtsabbieger3	Spielendes Kind3	3
44	Falschauslösung3	Spielendes Kind3	Rechtsabbieger3	3
45	Falschauslösung4	Rechtsabbieger4	Spielendes Kind4	4
46	Falschauslösung4	Spielendes Kind4	Rechtsabbieger4	4
47	Falschauslösung4	Rechtsabbieger4	Spielendes Kind4	4
48	Falschauslösung4	Spielendes Kind4	Rechtsabbieger4	4

Tabelle 18: Versuchsplan für Testfälle 2 und 3

VP	Testfall 2				Testfall 3
	1. Prüfung- gebung:	2. Prüfung- gebung:	Assistenzsystem:	Gegenfahr- streifen:	Assistenzsystem:
1	Real	VIL	keine	frei	Lenkmoment
2	Real	VIL	keine	frei	Führung ohne Warnton
3	Real	VIL	keine	frei	Führung mit Warnton
4	Real	VIL	keine	belegt	Lenkmoment
5	Real	VIL	keine	belegt	Führung ohne Warnton
6	Real	VIL	keine	belegt	Führung mit Warnton
7	Real	VIL	Ausweichempfehlung	frei	Lenkmoment
8	Real	VIL	Ausweichempfehlung	frei	Führung ohne Warnton
9	Real	VIL	Ausweichempfehlung	frei	Führung mit Warnton
10	Real	VIL	Ausweichempfehlung	belegt	Lenkmoment
11	Real	VIL	Ausweichempfehlung	belegt	Führung ohne Warnton
12	Real	VIL	Ausweichempfehlung	belegt	Führung mit Warnton
13	Real	VIL	Führung ohne Warnton	frei	Lenkmoment
14	Real	VIL	Führung ohne Warnton	frei	Führung ohne Warnton
15	Real	VIL	Führung ohne Warnton	frei	Führung mit Warnton
16	Real	VIL	Führung ohne Warnton	belegt	Lenkmoment
17	Real	VIL	Führung ohne Warnton	belegt	Führung ohne Warnton
18	Real	VIL	Führung ohne Warnton	belegt	Führung mit Warnton

19	Real	VIL	Führung mit Warnton	frei	Lenkmoment
20	Real	VIL	Führung mit Warnton	frei	Führung ohne Warnton
21	Real	VIL	Führung mit Warnton	frei	Führung mit Warnton
22	Real	VIL	Führung mit Warnton	belegt	Lenkmoment
23	Real	VIL	Führung mit Warnton	belegt	Führung ohne Warnton
24	Real	VIL	Führung mit Warnton	belegt	Führung mit Warnton
25	VIL	Real	keine	frei	Lenkmoment
26	VIL	Real	keine	frei	Führung ohne Warnton
27	VIL	Real	keine	frei	Führung mit Warnton
28	VIL	Real	keine	belegt	Lenkmoment
29	VIL	Real	keine	belegt	Führung ohne Warnton
30	VIL	Real	keine	belegt	Führung mit Warnton
31	VIL	Real	Ausweichempfehlung	frei	Lenkmoment
32	VIL	Real	Ausweichempfehlung	frei	Führung ohne Warnton
33	VIL	Real	Ausweichempfehlung	frei	Führung mit Warnton
34	VIL	Real	Ausweichempfehlung	belegt	Lenkmoment
35	VIL	Real	Ausweichempfehlung	belegt	Führung ohne Warnton
36	VIL	Real	Ausweichempfehlung	belegt	Führung mit Warnton
37	VIL	Real	Führung ohne Warnton	frei	Lenkmoment
38	VIL	Real	Führung ohne Warnton	frei	Führung ohne Warnton
39	VIL	Real	Führung ohne Warnton	frei	Führung mit Warnton
40	VIL	Real	Führung ohne Warnton	belegt	Lenkmoment
41	VIL	Real	Führung ohne Warnton	belegt	Führung ohne Warnton
42	VIL	Real	Führung ohne Warnton	belegt	Führung mit Warnton
43	VIL	Real	Führung mit Warnton	frei	Lenkmoment
44	VIL	Real	Führung mit Warnton	frei	Führung ohne Warnton
45	VIL	Real	Führung mit Warnton	frei	Führung mit Warnton
46	VIL	Real	Führung mit Warnton	belegt	Lenkmoment
47	VIL	Real	Führung mit Warnton	belegt	Führung ohne Warnton
48	VIL	Real	Führung mit Warnton	belegt	Führung mit Warnton

B Fragebögen

KON-Parameter für das VIL

Fahrerfragebogen



der Bundeswehr
Universität  München

Fahrt Nr: _____
Abfolge: _____

Fragebogen I

Wir möchten Sie bitten, die folgenden Fragen zu Ihrer Person zu beantworten bzw. anzukreuzen.
Die Angaben sind selbstverständlich freiwillig, der Datenschutz wird gewährleistet.

Geschlecht: männlich weiblich
Händigkeit: Linkshänder Rechtshänder
Alter: _____ Jahre

Tragen Sie beim Autofahren für gewöhnlich eine Brille oder Kontaktlinsen? Ja Nein

Welche Stärke hat Ihre Brille bzw. Ihre Kontaktlinsen?

Ist Ihr räumliches Sehvermögen beeinträchtigt?

Ja Nein

Wenn ja, in welcher Weise?

Ist Ihre Fahrtüchtigkeit derzeit beeinträchtigt?

Ja Nein

Seit wann sind Sie im Besitz des Führerscheins (PKW)?

Wie viele km sind Sie in Ihrem Leben gefahren?

bis 100.000 km 100.000 – 300.000 km 300.000 – 500.000 km 500.000 – 1.000.000 km mehr als 1.000.000 km

Wie viele km fahren Sie ca. pro Jahr?

unter 5.000 km 5.000 - 10.000 km 10.000 - 15.000 km 15.000 - 20.000 km
 20.000 - 25.000 km 25.000 - 30.000 km 30.000 - 40.000 km über 40.000 km

Wie oft sind Sie mit dem Auto unterwegs?

weniger als 1 mal pro Woche 1-2 mal pro Woche 3-5 mal pro Woche täglich

Bringt Ihr Beruf das Führen eines Kraftfahrzeuges mit sich?

Ja Nein

Haben Sie bereits ein Fahrer-/ Fahrsicherheitstraining absolviert?

Ja Nein

Wenn ja, welches? (z.B. ADAC Fahrsicherheitstraining):

Probandenerklärung



Fahrt Nr: _____
Abfolge: _____

Probandenerklärung

Ich versichere hiermit, dass...

- ... ich eine gültige **Fahrerlaubnis** zum Führen des PKW besitze und mit mir trage.
- ... ich eine eventuell benötigte **Sehhilfe** dabei habe und auch benutze.
- ... ich mich gesundheitlich in einem **fahrtüchtigen Zustand** befinde.
- ... ich damit **einverstanden** bin, dass die Fahrdaten und Videobilder meiner Fahrt wissenschaftlich ausgewertet und in einer wissenschaftlichen Veröffentlichung verwendet werden dürfen, selbstverständlich ohne Nennung meines Namens.
- ... ich mir darüber im Klaren bin, dass es sich bei diesem Fahrzeug um einen **Prototypen** handelt. Ich verpflichte mich, sehr **sorgfältig** mit dem Fahrzeug umzugehen.
- ... ich mich trotz der Testumgebung an die **Verkehrsvorschriften** halte. In jeder Fahrsituation bleibe ich verantwortlicher Fahrzeugführer.

.....
Ort, Datum

.....
Unterschrift Versuchsteilnehmer

Zeitlücke bewerten / Zeitlücke herstellen



der Bundeswehr
Universität  München

Fragebogen II

Bitte bewerten Sie den Abstand, welchen Sie eben hergestellt haben. Der Abstand war...

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

Ist Ihnen das Herstellen des Abstandes gelungen?

ja nein

Wenn ja, wie gut ist Ihnen das Herstellen des Abstandes gelungen?

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

Wahrnehmung der TTC

Fragebogen II

Ist Ihnen das Schätzen des Zeitabstandes gelungen?

ja nein

Wenn ja, wie gut ist Ihnen das Schätzen des Zeitabstandes gelungen?

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

Hätten Sie das Fahrzeug beim Ausblenden der Sicht noch rechtzeitig vor einer Kollision abbremsen können?

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

Wie kritisch war in diesem Fall der Abstand zum stehenden Fahrzeug, als die Sicht ausgeblendet wurde?

Der Abstand war...

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

Wahrnehmung von Querabständen

Fragebogen II

Bitte bewerten Sie die Gassenbreite, welche Sie eben durchfahren haben.
Der Gassenbreite war...

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

Ist Ihnen das Durchfahren der Gasse gelungen?

ja nein

Wenn ja, wie gut ist Ihnen das Durchfahren der Gasse gelungen?

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

Wie viel Platz hatten sie zur Verfügung?

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

Vorderfahrzeug beschleunigt



der Bundeswehr
Universität  München

Fragebogen II

Ist Ihnen das Aufschließen zum Vorderfahrzeug gelungen?

ja nein

Wenn ja, wie gut ist Ihnen das Aufschließen gelungen?

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

Wie stark hat das Vorderfahrzeug beschleunigt?

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

Vorderfahrzeug verzögert



der Bundeswehr
Universität  München

Fragebogen II

Bitte bewerten Sie die Bremsituation, welche Sie eben durchfahren haben.
Der Situation war...

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

Ist Ihnen die Bewältigung der Situation gelungen?

ja nein

Wenn ja, wie gut ist Ihnen die Bewältigung der Situation gelungen?

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

Wie stark hat das Vorderfahrzeug verzögert?

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

Querverkehrsszenario

Fragebogen II

Bitte bewerten Sie die Situation, welche Sie eben durchfahren haben. Die Situation war...

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

Ist Ihnen das Ausweichen gelungen?

ja nein

Wenn ja, wie gut ist Ihnen das Ausweichen gelungen?

sehr schlecht			schlecht			mittel			gut			sehr gut		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Wie groß war der seitliche Abstand zu dem Fahrzeug, während ihres Ausweichmanövers?

sehr klein			klein			mittel			groß			sehr groß		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Testfall 1

Vorversuch



der Bundeswehr
 Universität  München

Fragebogen I

Bitte bewerten Sie die Ausweichsituation, die Sie eben erlebt haben. Die Situation war ...

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

Ist Ihnen eine vergleichbare Situation schon im Straßenverkehr begegnet?

ja nein

Wenn nein: Wie realistisch halten Sie die eben erlebte Situation?

komplett unrealistisch	Wenig realistisch	Evtl. möglich	realistisch	Sehr realistisch
------------------------	-------------------	---------------	-------------	------------------

Wie stufen Sie die Situation im Vergleich zur Situation davor ein?

Viel gefährlicher	gefährlicher	Kein Unterschied	harmloser	Viel harmloser
-------------------	--------------	------------------	-----------	----------------

Hauptversuch - Fahrerfragebogen



Fahrt Nr: _____
 Abfolge: _____

Fragebogen I

Wir möchten Sie bitten, die folgenden Fragen zu Ihrer Person zu beantworten bzw. anzukreuzen.
 Die Angaben sind selbstverständlich freiwillig, der Datenschutz wird gewährleistet.

Geschlecht: männlich weiblich
 Händigkeit: Linkshänder Rechtshänder
 Alter: _____ Jahre

Tragen Sie beim Autofahren für gewöhnlich eine Brille oder Kontaktlinsen? Ja Nein

Welche Stärke hat Ihre Brille bzw. Ihre Kontaktlinsen?

Ist Ihr räumliches Sehvermögen beeinträchtigt?

Ja Nein

Wenn ja, in welcher Weise?

Ist Ihre Fahrtüchtigkeit derzeit beeinträchtigt?

Ja Nein

Seit wann sind Sie im Besitz des Führerscheins (PKW)?

Wie viele km sind Sie in Ihrem Leben gefahren?

bis 100.000 km 100.000 – 300.000 km 300.000 – 500.000 km 500.000 – 1.000.000 km mehr als 1.000.000 km

Wie viele km fahren Sie ca. pro Jahr?

unter 5.000 km 5.000 - 10.000 km 10.000 - 15.000 km 15.000 - 20.000 km
 20.000 - 25.000 km 25.000 - 30.000 km 30.000 - 40.000 km über 40.000 km

Wie oft sind Sie mit dem Auto unterwegs? weniger als 1 mal pro Woche 1-2 mal pro Woche 3-5 mal pro Woche täglich

Bringt Ihr Beruf das Führen eines Kraftfahrzeuges mit sich?

Ja Nein

Haben Sie bereits ein Fahrer-/ Fahrsicherheitstraining absolviert?

Ja Nein

Wenn ja, welches? (z.B. ADAC Fahrsicherheitstraining):



Probandenerklärung

Ich versichere hiermit, dass...

- ... ich eine gültige **Fahrerlaubnis** zum Führen des PKW besitze und mit mir trage.
- ... ich eine eventuell benötigte **Sehhilfe** dabei habe und auch benutze.
- ... ich mich gesundheitlich in einem **fahrtüchtigen Zustand** befinde.
- ... ich damit **einverstanden** bin, dass die Fahrdaten und Videobilder meiner Fahrt wissenschaftlich ausgewertet und in einer wissenschaftlichen Veröffentlichung verwendet werden dürfen, selbstverständlich ohne Nennung meines Namens.
- ... ich mir darüber im Klaren bin, dass es sich bei diesem Fahrzeug um einen **Prototypen** handelt. Ich verpflichte mich, sehr **sorgfältig** mit dem Fahrzeug umzugehen.
- ... ich mich trotz der Testumgebung an die **Verkehrsvorschriften** halte. In jeder Fahrsituation bleibe ich verantwortlicher Fahrzeugführer.

.....
Ort, Datum

.....
Unterschrift Versuchsteilnehmer

Hauptversuch - Ausweichsituation



der Bundeswehr
Universität  München

Fragebogen II

Sie haben eben eine Fahrsituation erlebt, in der ein entgegenkommendes Fahrzeug ein Ausweichmanöver durchgeführt hat. Bitte beurteilen Sie die Fahrsituation.

Sie war ...

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

Konnten Sie erkennen warum das entgegenkommende Fahrzeug ausgewichen ist?

ja nein

Wenn ja, was war der Grund?

Wie schätzen Sie Ihre Reaktion ein?

Passend		Mittelmäßig		Unpassend
---------	--	-------------	--	-----------

Hat der Tempomat Sie in dieser Verkehrssituation gestört?

ja nein

Testfall 2

Fahrerfragebogen



Fahrt Nr: _____
 Abfolge: _____

Fragebogen I

Wir möchten Sie bitten, die folgenden Fragen zu Ihrer Person zu beantworten bzw. anzukreuzen.
 Die Angaben sind selbstverständlich freiwillig, der Datenschutz wird gewährleistet.

Geschlecht: männlich weiblich
 Händigkeit: Linkshänder Rechtshänder
 Alter: _____ Jahre

Tragen Sie beim Autofahren für gewöhnlich eine Brille oder Kontaktlinsen? Ja Nein

Welche Stärke hat Ihre Brille bzw. Ihre Kontaktlinsen?

Ist Ihr räumliches Sehvermögen beeinträchtigt?

Ja Nein

Wenn ja, in welcher Weise?

Ist Ihre Fahrtüchtigkeit derzeit beeinträchtigt?

Ja Nein

Seit wann sind Sie im Besitz des Führerscheins (PKW)?

Wie viele km sind Sie in Ihrem Leben gefahren?

bis 100.000 km 100.000 – 300.000 km 300.000 – 500.000 km 500.000 – 1.000.000 km mehr als 1.000.000 km

Wie viele km fahren Sie ca. pro Jahr?

unter 5.000 km 5.000 - 10.000 km 10.000 - 15.000 km 15.000 - 20.000 km
 20.000 - 25.000 km 25.000 - 30.000 km 30.000 - 40.000 km über 40.000 km

Wie oft sind Sie mit dem Auto unterwegs?

weniger als 1 mal pro Woche 1-2 mal pro Woche 3-5 mal pro Woche täglich

Bringt Ihr Beruf das Führen eines Kraftfahrzeuges mit sich?

Ja Nein

Haben Sie bereits ein Fahrer-/ Fahrsicherheitstraining absolviert?

Ja Nein

Wenn ja, welches? (z.B. ADAC Fahrsicherheitstraining):



Probandenerklärung

Ich versichere hiermit, dass...

- ... ich eine gültige **Fahrerlaubnis** zum Führen des PKW besitze und mit mir trage.
- ... ich eine eventuell benötigte **Sehhilfe** dabei habe und auch benutze.
- ... ich mich gesundheitlich in einem **fahrtüchtigen Zustand** befinde.
- ... ich damit **einverstanden** bin, dass die Fahrdaten und Videobilder meiner Fahrt wissenschaftlich ausgewertet und in einer wissenschaftlichen Veröffentlichung verwendet werden dürfen, selbstverständlich ohne Nennung meines Namens.
- ... ich mir darüber im Klaren bin, dass es sich bei diesem Fahrzeug um einen **Prototypen** handelt. Ich verpflichte mich, sehr **sorgfältig** mit dem Fahrzeug umzugehen.
- ... ich mich trotz der Testumgebung an die **Verkehrsvorschriften** halte. In jeder Fahrsituation bleibe ich verantwortlicher Fahrzeugführer.

.....
Ort, Datum

.....
Unterschrift Versuchsteilnehmer

Erstkontakt - "Ausweichempfehlung"



Fahrt Nr: _____

Abfolge: _____

Fragebogen IIb

Sie haben eben eine Situation erlebt, bei der von rechts ein Fahrzeug ausparkte.

Diese Situation war...

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

Sie haben von ihrem Auto eine Ausweichempfehlung erhalten. Wie äußerte sich diese?

Wie schätzen Sie Ihre Reaktion ein?

Passend		Mittelmäßig		Unpassend
---------	--	-------------	--	-----------

Wie sah diese Reaktion konkret aus (z.B. Lenken, Bremsen, Hupen,...)?

Warum haben Sie so reagiert?

Erstkontakt - "Führung (mit Ton)"

Fragebogen IIc

Sie haben eben eine Situation erlebt, bei der von rechts ein Fahrzeug ausparkte.

Diese Situation war...

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

In diesem Moment hat ein Ausweichassistent eingegriffen. Was haben Sie dabei alles wahrgenommen (gesehen, gehört, gefühlt,...)?

Wie schätzen Sie Ihre Reaktion ein?

Passend		Mittelmäßig		Unpassend
---------	--	-------------	--	-----------

Wie sah diese Reaktion konkret aus (z.B. Lenken, Bremsen, Hupen,...)?

Warum haben Sie so reagiert?

Erstkontakt - "Ohne Assistenz"



Fragebogen IIa

Sie haben eben eine Situation erlebt, bei der von rechts ein Fahrzeug ausparkte.

Diese Situation war...

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

Wie schätzen Sie Ihre Reaktion ein?

Passend		Mittelmäßig		Unpassend
---------	--	-------------	--	-----------

Wie sah diese Reaktion konkret aus (z.B. Lenken, Bremsen, Hupen,...)?

Warum haben Sie so reagiert?

Zweite Ausweichsituation - "Ausweichempfehlung"

Fragebogen IIIb

Sie haben eben eine Situation erlebt, bei der von rechts ein Fahrzeug ausparkte.

Diese Situation war...

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

In diesem Moment haben Sie eine Ausweichempfehlung erhalten. Was haben Sie dabei alles wahrgenommen (gesehen, gehört, gefühlt,...)?

Wie schätzen Sie Ihre Reaktion ein?

Passend		Mittelmäßig		Unpassend
---------	--	-------------	--	-----------

Wie sah diese Reaktion konkret aus (z.B. Lenken, Bremsen, Hupen,...)?

Warum haben Sie so reagiert?



Wie Sie wahrscheinlich gemerkt haben, ging es im heutigen Versuch primär um die Untersuchung einer **Ausweichempfehlung**. Solche Systeme sollen in Zukunft helfen, **Unfälle im Stadtverkehr zu vermeiden**, wenn es zum Bremsen schon zu spät ist.

Würden Sie das heute erlebte System im Straßenverkehr akzeptieren?

Ich finde den Ausweichassistenten...

- überhaupt nicht akzeptabel*
- nicht akzeptabel*
- eher nicht akzeptabel*
- eher akzeptabel*
- akzeptabel*
- voll akzeptabel*

Fanden Sie das heute erlebte System hilfreich?

Ich finde den Ausweichassistenten...

- sehr hilfreich*
- hilfreich*
- eher hilfreich*
- eher nicht hilfreich*
- nicht hilfreich*
- überhaupt nicht hilfreich*

Begründung:

Zweite Ausweichsituation - "Führung (mit Ton)"

Fragebogen IIIc

Sie haben eben eine Situation erlebt, bei der von rechts ein Fahrzeug ausparkte.

Diese Situation war...

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

In diesem Moment haben Sie eine Ausweichempfehlung erhalten. Was haben Sie dabei alles wahrgenommen (gesehen, gehört, gefühlt,...)?

Wie schätzen Sie Ihre Reaktion ein?

Passend		Mittelmäßig		Unpassend
---------	--	-------------	--	-----------

Wie sah diese Reaktion konkret aus (z.B. Lenken, Bremsen, Hupen,...)?

Warum haben Sie so reagiert?



Wie Sie wahrscheinlich gemerkt haben, ging es im heutigen Versuch primär um die Untersuchung einer **Ausweichempfehlung**. Solche Systeme sollen in Zukunft helfen, **Unfälle im Stadtverkehr zu vermeiden**, wenn es zum Bremsen schon zu spät ist.

Würden Sie das heute erlebte System im Straßenverkehr akzeptieren?

Ich finde den Ausweichassistenten...

- überhaupt nicht akzeptabel*
- nicht akzeptabel*
- eher nicht akzeptabel*
- eher akzeptabel*
- akzeptabel*
- voll akzeptabel*

Fanden Sie das heute erlebte System hilfreich?

Ich finde den Ausweichassistenten...

- sehr hilfreich*
- hilfreich*
- eher hilfreich*
- eher nicht hilfreich*
- nicht hilfreich*
- überhaupt nicht hilfreich*

Begründung:

Zweite Ausweichsituation - "Ohne System"



Fahrt Nr: _____

Abfolge: _____

Fragebogen IIIa

Sie haben eben eine Situation erlebt, bei der von rechts ein Fahrzeug ausparkte.

Diese Situation war...

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

Wie schätzen Sie Ihre Reaktion ein?

Passend		Mittelmäßig		Unpassend
---------	--	-------------	--	-----------

Wie sah diese Reaktion konkret aus (z.B. Lenken, Bremsen, Hupen,...)?

Warum haben Sie so reagiert?

Testfall 3



Fragebogen IV

**Sie haben eben eine Fehlauflösung eines Ausweichassistenten erlebt.
 Sie war...**

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

Wie schätzen Sie Ihre Reaktion ein?

Passend		Mittelmäßig		Unpassend
---------	--	-------------	--	-----------

Solche Fehlauflösungen sind selten, können aber auftreten.

*Würden Sie zugunsten des Systemnutzens gelegentliche unerwünschte
 Auflösungen akzeptieren?*

Unerwünschte Auflösungen empfinde ich als. . . .

- überhaupt nicht akzeptabel*
- nicht akzeptabel*
- eher nicht akzeptabel*
- eher akzeptabel*
- akzeptabel*
- voll akzeptabel*

C Statistik

a) KON-Parameter für das VIL

Wahrnehmung von Längsabständen

Tabelle 19: ZB: SBFV-Urteil, HZ: THW bei Tastendruck

ZB	SBFV-Urteil		ZH	THW bei Tastendruck	
	Realfahrzeug	VIL		Realfahrzeug	VIL
Bedingung:			Bedingung:		
THW = 2.25 s	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = 1.43 <i>sd</i> = .68	<i>N</i> = 29 <i>mean</i> = 2.97 <i>sd</i> = 1.27	"harmlos"	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = 1.81 s <i>sd</i> = .68 s	<i>N</i> = 28 <i>mean</i> = 3.28 s <i>sd</i> = 1.34 s
THW = 1.50 s	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = 2.87 <i>sd</i> = 1.41	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = 4.17 <i>sd</i> = 1.78	"unangenehm"	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = .88 s <i>sd</i> = .31 s	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = 1.36 s <i>sd</i> = .60 s
THW = .75 s	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = 5.70 <i>sd</i> = 1.73	<i>N</i> = 29 <i>mean</i> = 7.13 <i>sd</i> = 1.60	"gefährlich"	<i>N</i> = 30 s <i>mean</i> = .57 s <i>sd</i> = .48 s	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = .69 s <i>sd</i> = .30 s
Korrelation:	$r_s(88) = .967, p < .001$		Korrelation:	$r(88) = .986, p < .001$	

Wahrnehmung der TTC

Tabelle 20: TTC: Subjektivurteile und Einschätzung der TTC

TTC	SBFV-Urteil		Geschätzte TTC	
	Realfahrzeug	VIL	Realfahrzeug	VIL
Bedingung:				
TTC bei Whitescreen: 1.5 s	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = 6.27 <i>sd</i> = 1.82	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = 7.47 <i>sd</i> = 1.59	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = 1.02 s <i>sd</i> = .27 s	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = 1.26 s <i>sd</i> = .22 s
TTC bei Whitescreen: 2.0 s	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = 5.60 <i>sd</i> = 1.57	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = 6.53 <i>sd</i> = 1.66	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = 1.48 s <i>sd</i> = .27 s	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = 1.54 s <i>sd</i> = .38 s
TTC bei Whitescreen: 2.5 s	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = 4.50 <i>sd</i> = 1.76	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = 5.83 <i>sd</i> = 1.60	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = 1.81 s <i>sd</i> = .40 s	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = 1.69 s <i>sd</i> = .53 s
Korrelation:	$r_s(90) = .972, p < .001$		$r(90) = .990, p < .001$	

Wahrnehmung von Querabständen

Tabelle 21: GB: SBFV-Urteil und Einfahrtgeschwindigkeit in die Gasse

GB	SBFV-Urteil		Einfahrtgeschwindigkeit	
	Realfahrzeug	VIL	Realfahrzeug	VIL
Gassenbreite:				
2.25 m	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = 5.23 <i>sd</i> = 1.89	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = 4.33 <i>sd</i> = 2.14	<i>N</i> = 29 <i>mean</i> = 46.15 km/h <i>sd</i> = 6.84 km/h	<i>N</i> = 28 <i>mean</i> = 45.13 km/h <i>sd</i> = 6.50 km/h
2.75 m	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = 3.40 <i>sd</i> = 1.55	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = 3.80 <i>sd</i> = 1.79	<i>N</i> = 29 <i>mean</i> = 47.37 km/h <i>sd</i> = 6.25 km/h	<i>N</i> = 27 <i>mean</i> = 45.48 km/h <i>sd</i> = 6.28 km/h
3.25 m	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = 2.33 <i>sd</i> = 1.35	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = 3.07 <i>sd</i> = 2.10	<i>N</i> = 29 <i>mean</i> = 50.10 km/h <i>sd</i> = 1.37 km/h	<i>N</i> = 27 <i>mean</i> = 48.13 km/h <i>sd</i> = 3.70 km/h
3.75 m	<i>N</i> = 28 <i>mean</i> = 1.75 <i>sd</i> = .97	<i>N</i> = 28 <i>mean</i> = 3.01 <i>sd</i> = 1.81	<i>N</i> = 28 <i>mean</i> = 51.23 km/h <i>sd</i> = 1.72 km/h	<i>N</i> = 27 <i>mean</i> = 49.60 km/h <i>sd</i> = 2.60 km/h
Korrelation:	$r_s(118) = .970, p < .001$		$r(108) = .910, p < .001$	

Tabelle 22: GB: Mittlere Spurabweichung und Betrag der maximalen Spurabweichung

GB	Mittlere Spurabweichung		Maximale Spurabweichung (Betrag)	
	Realfahrzeug	VIL	Realfahrzeug	VIL
Gassenbreite:				
2.25 m	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = .03 m <i>sd</i> = .07 m	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = .15 m <i>sd</i> = .17 m	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = .09 m <i>sd</i> = .05 m	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = .25 m <i>sd</i> = .09 m
2.75 m	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = -.01 m <i>sd</i> = .13 m	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = .18 m <i>sd</i> = .17 m	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = .14 m <i>sd</i> = .08 m	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = .29 m <i>sd</i> = .11 m
3.25 m	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = -.06 m <i>sd</i> = .17 m	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = .10 m <i>sd</i> = .10 m	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = .17 m <i>sd</i> = .12 m	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = .18 m <i>sd</i> = .10 m
3.75 m	<i>N</i> = 28 <i>mean</i> = -.02 m <i>sd</i> = .17 m	<i>N</i> = 28 <i>mean</i> = .03 m <i>sd</i> = .17 m	<i>N</i> = 28 <i>mean</i> = .15 m <i>sd</i> = .09 m	<i>N</i> = 28 <i>mean</i> = .28 m <i>sd</i> = .11 m
Korrelation:	$r(118) = .986, p < .001$		$r(118) = .961, p < .001$	

Verhalten in dynamischen Längsverkehrssituationen

Tabelle 23: FV: SBFV-Urteil, Reaktionszeit und maximale Verzögerung

FV	SBFV-Urteil		Reaktionszeit [s]		max. Verzögerung [m/s ²]	
	Realfahrzeug	VIL	Realfahrzeug	VIL	Realfahrzeug	VIL
a TO:						
-1 m/s ²	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = 2.43 <i>sd</i> = 1.10	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = 3.27 <i>sd</i> = 1.70	<i>N</i> = 28 <i>mean</i> = 1.71 <i>sd</i> = .43	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = 2.72 <i>sd</i> = .84	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = -2.47 <i>sd</i> = .57	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = -2.99 <i>sd</i> = .72
-3 m/s ²	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = 2.50 <i>sd</i> = 1.25	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = 3.77 <i>sd</i> = 1.59	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = .83 <i>sd</i> = .38	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = 1.18 <i>sd</i> = .47	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = -3.81 <i>sd</i> = .61	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = -4.53 <i>sd</i> = 1.60
-5 m/s ²	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = 3.37 <i>sd</i> = 1.45	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = 4.33 <i>sd</i> = 1.71	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = .74 <i>sd</i> = .24	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = 1.07 <i>sd</i> = .25	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = -5.40 <i>sd</i> = 1.25	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = -5.36 <i>sd</i> = 1.34
Korrel.	$r_s(90) = .945, p < .001$		$r(88) = .915, p < .001$		$r(90) = .982, p < .001$	

Tabelle 24: FB: Reaktionszeit und maximale Beschleunigung

FB	Reaktionszeit		max. Beschleunigung	
	Realfahrzeug	VIL	Realfahrzeug	VIL
a TO				
0.5 m/s ²	<i>N</i> = 29 <i>mean</i> = 1.10 s <i>sd</i> = .51 s	<i>N</i> = 29 <i>mean</i> = 2.33 s <i>sd</i> = 1.22 s	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = 1.53 m/s ² <i>sd</i> = .53 m/s ²	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = 1.65 m/s ² <i>sd</i> = .27 m/s ²
1.5 m/s ²	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = .74 s <i>sd</i> = .43 s	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = 1.35 s <i>sd</i> = .63 s	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = 3.01 m/s ² <i>sd</i> = .77 m/s ²	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = 2.55 m/s ² <i>sd</i> = .51 m/s ²
2.5 m/s ²	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = .45 s <i>sd</i> = .26 s	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = 1.13 s <i>sd</i> = .39 s	<i>N</i> = 30 <i>mean</i> = 3.45 m/s ² <i>sd</i> = .87 m/s ²	<i>N</i> = 29 <i>mean</i> = 2.96 m/s ² <i>sd</i> = .75 m/s ²
Korrelation:	$r(89) = .961, p < .001$		$r(89) = .963, p < .001$	

Verhalten in dynamischen Querverkehrssituationen

Tabelle 25: SBFV-Urteil bei "Ausweichen" und "Bremsen"

QV	"Ausweicher": SBFV-Urteil		"Bremsen": SBFV-Urteil	
	Realfahrzeug	VIL	Realfahrzeug	VIL
v TO				
10 km/h	<i>N</i> = 16 <i>mean</i> = 2.38 <i>sd</i> = 1.03	<i>N</i> = 15 <i>mean</i> = 3.60 <i>sd</i> = 1.72	<i>N</i> = 14 <i>mean</i> = 2.14 <i>sd</i> = 1.17	<i>N</i> = 15 <i>mean</i> = 2.67 <i>sd</i> = 1.50
30 km/h	<i>N</i> = 17 <i>mean</i> = 3.82 <i>sd</i> = 1.33	<i>N</i> = 20 <i>mean</i> = 4.55 <i>sd</i> = 1.70	<i>N</i> = 13 <i>mean</i> = 3.46 <i>sd</i> = 2.11	<i>N</i> = 10 <i>mean</i> = 4.58 <i>sd</i> = 2.07
50 km/h	<i>N</i> = 17 <i>mean</i> = 3.71 <i>sd</i> = 1.45	<i>N</i> = 15 <i>mean</i> = 6.07 <i>sd</i> = 2.02	<i>N</i> = 13 <i>mean</i> = 3.62 <i>sd</i> = 1.90	<i>N</i> = 15 <i>mean</i> = 4.87 <i>sd</i> = 1.36
Korrelation:	$r_s(50) = .975, p < .001$		$r_s(40) = .928, p < .001$	

Tabelle 26: QV: min. Abstand zum Querverkehrsfahrzeug bei "Ausweichen" und "Bremsen"

QV	"Ausweicher": min. Abstand zum Querverkehrsfahrzeug		"Bremsen": min. Abstand zum Querverkehrsfahrzeug	
	Realfahrzeug	VIL	Realfahrzeug	VIL
v TO				
10 km/h	<i>N</i> = 16 <i>mean</i> = 2.42 m <i>sd</i> = 1.05 m	<i>N</i> = 15 <i>mean</i> = 1.91 m <i>sd</i> = .65 m	<i>N</i> = 14 <i>mean</i> = 19.86 m <i>sd</i> = 7.68 m	<i>N</i> = 15 <i>mean</i> = 20.18 m <i>sd</i> = 6.87 m
30 km/h	<i>N</i> = 17 <i>mean</i> = 2.42 m <i>sd</i> = .99 m	<i>N</i> = 20 <i>mean</i> = 2.27 m <i>sd</i> = .88 m	<i>N</i> = 13 <i>mean</i> = 16.66 m <i>sd</i> = 8.21 m	<i>N</i> = 10 <i>mean</i> = 13.75 m <i>sd</i> = 7.12 m
50 km/h	<i>N</i> = 17 <i>mean</i> = 2.43 m <i>sd</i> = 1.06 m	<i>N</i> = 15 <i>mean</i> = 2.01 m <i>sd</i> = .58 m	<i>N</i> = 13 <i>mean</i> = 17.79 m <i>sd</i> = 4.21 m	<i>N</i> = 15 <i>mean</i> = 15.02 m <i>sd</i> = 5.62 m
Korrelation:	$r(50) = .985, p < .001$		$r(40) = .977, p < .001$	

Tabelle 27: QV: Reaktionszeiten bei "Ausweichen" und "Bremsen"

QV	"Ausweicher": Reaktionszeit		"Bremsen": Reaktionszeit	
	Realfahrzeug	VIL	Realfahrzeug	VIL
v TO				
10 km/h	<i>N</i> = 16 <i>mean</i> = 1.65 s <i>sd</i> = .59 s	<i>N</i> = 15 <i>mean</i> = 1.87 s <i>sd</i> = .59 s	<i>N</i> = 14 <i>mean</i> = 1.32 s <i>sd</i> = .49 s	<i>N</i> = 15 <i>mean</i> = 1.55 s <i>sd</i> = .65 s
30 km/h	<i>N</i> = 17 <i>mean</i> = 1.53 s <i>sd</i> = .56 s	<i>N</i> = 20 <i>mean</i> = 1.86 s <i>sd</i> = .43 s	<i>N</i> = 13 <i>mean</i> = 1.29 s <i>sd</i> = .48 s	<i>N</i> = 10 <i>mean</i> = 1.38 s <i>sd</i> = .36 s
50 km/h	<i>N</i> = 17 <i>mean</i> = 1.64 s <i>sd</i> = .57 s ²	<i>N</i> = 15 <i>mean</i> = 1.67 s <i>sd</i> = .37 s	<i>N</i> = 13 <i>mean</i> = 1.33 s <i>sd</i> = .22 s	<i>N</i> = 15 <i>mean</i> = 1.45 s <i>sd</i> = .30 s
Korrelation:	$r(50) = .991, p < .001$		$r(40) = .980, p < .001$	

Tabelle 28: QV: maximale Verzögerung bei "Ausweichern " und "Bremsern"

QV	"Ausweicher": max. Verzögerung		"Bremsen": max. Verzögerung	
	Realfahrzeug	VIL	Realfahrzeug	VIL
v TO				
10 km/h	$N = 16$ $mean = -1.72 \text{ m/s}^2$ $sd = 1.27 \text{ m/s}^2$	$N = 15$ $mean = -2.95 \text{ m/s}^2$ $sd = 1.16 \text{ m/s}^2$	$N = 14$ $mean = -3.59 \text{ m/s}^2$ $sd = 1.22 \text{ m/s}^2$	$N = 15$ $mean = -5.08 \text{ m/s}^2$ $sd = 2.41 \text{ m/s}^2$
30 km/h	$N = 17$ $mean = -1.50 \text{ m/s}^2$ $sd = 1.60 \text{ m/s}^2$	$N = 20$ $mean = -4.07 \text{ m/s}^2$ $sd = 2.53 \text{ m/s}^2$	$N = 13$ $mean = -5.52 \text{ m/s}^2$ $sd = 1.87 \text{ m/s}^2$	$N = 10$ $mean = -4.83 \text{ m/s}^2$ $sd = 1.15 \text{ m/s}^2$
50 km/h	$N = 17$ $mean = -1.75 \text{ m/s}^2$ $sd = 1.05 \text{ m/s}^2$	$N = 15$ $mean = -3.93 \text{ m/s}^2$ $sd = 1.10 \text{ m/s}^2$	$N = 13$ $mean = -4.81 \text{ m/s}^2$ $sd = 2.16 \text{ m/s}^2$	$N = 15$ $mean = -6.53 \text{ m/s}^2$ $sd = 1.32 \text{ m/s}^2$
Korrelation:	$r(50) = .910, p < .001$		$r(40) = .984, p < .001$	

Tabelle 29: QV: "Ausweicher": Querversatz und maximale Querbeschleunigung

QV	"Ausweicher": Querversatz		"Ausweicher": max. Querbeschleunigung	
	Realfahrzeug	VIL	Realfahrzeug	VIL
v TO				
10 km/h	$N = 16$ $mean = 2.37 \text{ m}$ $sd = .72 \text{ m}$	$N = 15$ $mean = 2.31 \text{ m}$ $sd = .77 \text{ m}$	$N = 16$ $mean = 1.03 \text{ m/s}^2$ $sd = .49 \text{ m/s}^2$	$N = 15$ $mean = 1.35 \text{ m/s}^2$ $sd = .52 \text{ m/s}^2$
30 km/h	$N = 17$ $mean = 2.50 \text{ m}$ $sd = .89 \text{ m}$	$N = 20$ $mean = 2.60 \text{ m}$ $sd = 1.02 \text{ m}$	$N = 17$ $mean = 1.41 \text{ m/s}^2$ $sd = .77 \text{ m/s}^2$	$N = 20$ $mean = 1.50 \text{ m/s}^2$ $sd = .87 \text{ m/s}^2$
50 km/h	$N = 17$ $mean = 2.11 \text{ m}$ $sd = 1.11 \text{ m}$	$N = 15$ $mean = 2.28 \text{ m}$ $sd = .98 \text{ m/s}^2$	$N = 17$ $mean = 1.29 \text{ m/s}^2$ $sd = .69 \text{ m/s}^2$	$N = 15$ $mean = 2.08 \text{ m/s}^2$ $sd = .58 \text{ m/s}^2$
Korrelation:	$r(50) = .981, p < .001$		$r(50) = .983, p < .001$	

b) Testfall 1

Reaktionszeit

Tabelle 30: Reaktionszeiten - Post-hoc t-Tests

Fahrsituationen	Abbieger – Kind	Abbieger – Falschauslösung	Kind – Falschauslösung
	$t(38) = -6.120$ $p < .001$ $r = .705$	$t(43) = -1.814$ $p = .077$ $r = .267$	$t(42) = 4.861$ $p < .001$ $r = .600$
Parameter-Sets	Set1 – Set2	Set1 – Set3	Set2 – Set3
	$t(69) = .776$ $p = .441$ $r = .093$	$t(67) = -2.028$ $p = .047$ $r = .240$	$t(66) = -3.403$ $p = .001$ $r = .386$
	Set3 – Set4	Set2 – Set4	Set1 – Set4
	$t(63) = 2.361$ $p = .021$ $r = .274$	$t(65) = -.845$ $p = .401$ $r = .104$	$t(66) = .862$ $p = .451$ $r = .106$

Abstand zum ausweichenden Fahrzeug

Tabelle 31: Abstand zum ausweichenden Fahrzeug - Post-hoc t-Tests

Fahrsituationen	Abbieger – Kind	Abbieger – Falschauslösung	Kind – Falschauslösung
	$t(47) = 8.087$ $p < .001$ $r = .763$	$t(47) = -.238$ $p = .813$ $r = .035$	$t(47) = -6.660$ $p < .001$ $r = .697$
Parameter-Sets	Set1 – Set2	Set1 – Set3	Set2 – Set3
	$t(70) = -4.011$ $p < .001$ $r = .433$	$t(70) = -12.212$ $p < .001$ $r = .825$	$t(70) = -5.836$ $p < .001$ $r = .572$
	Set3 – Set4	Set2 – Set4	Set1 – Set4
	$t(70) = -1.923$ $p = .059$ $r = .224$	$t(70) = -7.988$ $p < .001$ $r = .690$	$t(70) = -16.453$ $p < .001$ $r = .891$

Querversatz

Tabelle 32: Querversatz - Post-hoc t-Tests

	Abbieger – Kind	Abbieger – Falschauslösung	Kind – Falschauslösung
Fahrsituationen	$t(47) = -.974$ $p = .335$ $r = .140$	$t(47) = -1.413$ $p = .164$ $r = .202$	$t(47) = 2.333$ $p = .024$ $r = .322$
Parameter-Sets	Set1 – Set2	Set1 – Set3	Set2 – Set3
	$t(70) = -2.515$ $p = .013$ $r = .288$	$t(70) = 1.406$ $p = .164$ $r = .166$	$t(70) = 3.703$ $p < .001$ $r = .405$
	Set3 – Set4	Set2 – Set4	Set1 – Set4
	$t(70) = 1.360$ $p = .178$ $r = .160$	$t(70) = 2.602$ $p = .011$ $r = .297$	$t(70) = 0.071$ $p = .944$ $r = .008$

Querbeschleunigung

Tabelle 33: Maximale Querbeschleunigung - Post-hoc t-Tests

	Abbieger – Kind	Abbieger – Falschauslösung	Kind – Falschauslösung
Fahrsituationen	$t(47) = -3.019$ $p = .004$ $r = .403$	$t(47) = -.552$ $p = .584$ $r = .080$	$t(47) = 2.656$ $p = .011$ $r = .361$
Parameter-Sets	Set1 – Set2	Set1 – Set3	Set2 – Set3
	$t(70) = -.612$ $p = .543$ $r = .073$	$t(70) = 4.371$ $p < .001$ $r = .463$	$t(70) = 5.506$ $p < .001$ $r = .550$
	Set3 – Set4	Set2 – Set4	Set1 – Set4
	$t(70) = .396$ $p = .693$ $r = .044$	$t(70) = 6.050$ $p < .001$ $r = .586$	$t(70) = 4.806$ $p < .001$ $r = .498$

Längsverzögerung

Tabelle 34: Maximale Verzögerung - Post-hoc t-Tests

	Abbieger – Kind	Abbieger – Falschauslösung	Kind – Falschauslösung
Fahrsituationen	$t(47) = 8.383$ $p < .001$ $r = .774$	$t(47) = -11.885$ $p < .001$ $r = .866$	$t(47) = -3.505$ $p = .001$ $r = .455$
Parameter-Sets	Set1 – Set2	Set1 – Set3	Set2 – Set3
	$t(70) = -4.555$ $p < .001$ $r = .478$	$t(70) = -4.056$ $p < .001$ $r = .436$	$t(70) = -.348$ $p = .729$ $r = .042$
	Set3 – Set4	Set2 – Set4	Set1 – Set4
	$t(70) = -3.888$ $p < .001$ $r = .421$	$t(70) = -3.587$ $p < .001$ $r = .394$	$t(70) = -9.617$ $p < .001$ $r = .754$

Subjektive Bewertung: SBFV-Urteil

Tabelle 35: SBFV-Urteil - Post-hoc Wilcoxon/Mann-Whitney-U-Tests

	Abbieger – Kind	Abbieger – Falschauslösung	Kind – Falschauslösung
Fahrsituationen	$Z = -5.296$ $p < .001$ $r = -.764$	$Z = -.309$ $p = .813$ $r = -.045$	$Z = -5.105$ $p < .001$ $r = -0.737$
Parameter-Sets	Set1 – Set2	Set1 – Set3	Set2 – Set3
	$U = 261.500$ $z = -4.395$ $p < .001$ $r = -.518$	$U = 225.000$ $z = -4.818$ $p < .001$ $r = -.567$	$U = 628.000$ $z = -.229$ $p = .819$ $r = -.027$
	Set3 – Set4	Set2 – Set4	Set1 – Set4
	$U = 488.000$ $z = -1.830$ $p = .067$ $r = -.216$	$U = 496.500$ $z = -1.736$ $p = .082$ $r = -.205$	$U = 141.000$ $z = -5.755$ $p < .001$ $r = -.678$

c) Testfall 2

Vergleich Erstkontakt - Zweitkontakt:

Tabelle 36: Vergleich Erstkontakt - Zweitkontakt: Deskriptive Statistik

Versuchsparameter		Real			VIL		
		<i>n</i>	<i>mean</i>	<i>sd</i>	<i>n</i>	<i>mean</i>	<i>sd</i>
Minimaler Abstand zum Querverkehr in [m]	Erstkontakt	24	1.23	1.01	24	1.26	0.84
	Zweitkontakt	24	1.57	1.07	24	1.47	1.08
Maximaler Querversatz in [m]	Erstkontakt	24	0.73	0.48	24	0.90	0.60
	Zweitkontakt	24	0.93	0.62	24	1.06	0.65
Maximale Querbeschleunigung in [m/s ²]	Erstkontakt	24	1.79	1.33	24	1.46	1.34
	Zweitkontakt	24	2.02	1.38	24	1.53	1.20
Maximale Verzögerung in [m/s ²]	Erstkontakt	24	-4.82	2.48	24	-6.71	2.94
	Zweitkontakt	24	-5.33	2.82	24	-6.65	3.33
Handlenkmoment maximal in [Nm]	Erstkontakt	24	2.51	2.01	24	2.96	2.56
	Zweitkontakt	24	2.74	2.08	24	2.72	1.80
Handlenkmoment minimal in [Nm]	Erstkontakt	24	-4.35	1.60	24	-4.40	1.67
	Zweitkontakt	24	-4.28	1,64	24	-4.32	1.84
Gierrate maximal in [°/s]	Erstkontakt	24	6.90	5.23	24	6.61	5.71
	Zweitkontakt	24	7.96	5.58	24	6.86	5.22
Gierrate minimal in [°/s]	Erstkontakt	24	-7.45	5.15	24	-5.39	4.97
	Zweitkontakt	24	-8.48	5.64	24	-5.74	4.28
Lenkradwinkel maximal in [°]	Erstkontakt	24	21.54	23.47	24	30.03	43.48
	Zweitkontakt	24	28.56	24.33	24	26.79	23.76
Lenkradwinkel minimal in [°]	Erstkontakt	24	-37.75	22.63	24	-39.07	40.23
	Zweitkontakt	24	-50.64	23.61	24	-36.33	25.34
Fahrzeugreaktion Distanz zum Querverkehr bei Reaktion in [m]	Erstkontakt	21	13.45	2.92	22	11.79	2.81
	Zweitkontakt	20	15.20	3.88	18	12.82	4.06
Fahrzeugreaktion TTC bei Reaktion in [s]	Erstkontakt	21	0.98	0.21	22	0.89	0.20
	Zweitkontakt	20	1.10	0.25	18	0.96	0.29
SBFV-Urteil	Erstkontakt	24	6.13	1.99	24	6.21	1.62
	Zweitkontakt	24	4.50	1.62	24	5.24	1.72

Tabelle 37: Vergleich Erstkontakt - Zweitkontakt: Signifikanztests

Versuchsparameter	Real	VIL
Minimaler Abstand zum Querverkehr	$t(46) = -1.143,$ $p = .259$	$t(46) = -.724,$ $p = .473$
Maximaler Querversatz	$t(46) = -1.224,$ $p = .227$	$t(46) = -.893,$ $p = .376$
Maximale Querbeschleunigung	$t(46) = -.595,$ $p = .555$	$t(46) = -.189,$ $p = .851$
Maximale Verzögerung	$t(46) = .663,$ $p = .511$	$t(46) = .070,$ $p = .944$
Handlenkmoment maximal	$t(46) = -.395,$ $p = .695$	$t(46) = -.369,$ $p = .713$
Handlenkmoment minimal	$t(46) = -.160,$ $p = .874$	$t(46) = -.151,$ $p = .880$
Gierrate maximal	$t(46) = -.679,$ $p = .501$	$t(46) = -.159,$ $p = .874$
Gierrate minimal	$t(46) = -.656,$ $p = .515$	$t(46) = .265,$ $p = .792$
Lenkradwinkel maximal	$t(46) = -1.018,$ $p = .314$	$t(46) = .321,$ $p = .750$
Lenkradwinkel minimal	$t(46) = 1.932,$ $p = .060$	$t(46) = -.282,$ $p = .779$
Fahrzeugreaktion Distanz zum Querverkehr bei Reaktion	$t(39) = -1.638,$ $p = .109$	$t(38) = -.945,$ $p = .350$
Fahrzeugreaktion TTC bei Reaktion	$t(39) = -1.646,$ $p = .108$	$t(38) = -.891,$ $p = .378$
SBFV-Urteil	$U = 151.00, z = -2.86,$ $p < .05, r = -.41$	$U = 204.50, z = -1.76,$ $p = .079$

Faktoranalyse

Tabelle 38: Varianzanalyse: Faktoren Prüfumgebung, Assistenz, Gegenfahrbahn

Versuchsparameter	Prüfumgebung	Assistenz	Gegenfahrbahn
Min. Abstand zum Querverkehr	$F(1,40) = .023$ $p = .880$ $r = .024$	$F(3,40) = 1.175$ $p = .331$	$F(1,40) = 10.211$ $p = .003$ $r = .451$
Max. Querversatz	$F(1,40) = 2.861$ $p = .101$ $r = .258$	$F(3,40) = 1.042$ $p = .385$	$F(1,40) = 23.434$ $p < .001$ $r = .608$
Min. Querbeschleunigung	$F(1,40) = 12.242$ $p = .001$ $r = .484$	$F(3,40) = .629$ $p = .601$	$F(1,40) = 13.311$ $p = .001$ $r = .450$
Max. Querbeschleunigung	$F(1,40) = 4.281$ $p = .045$ $r = .311$	$F(3,40) = .828$ $p = .486$	$F(1,40) = 21.928$ $p < .001$ $r = .595$
Max. Verzögerung	$F(1,40) = 16.925$ $p < .001$ $r = .545$	$F(3,40) = .411$ $p = .746$	$F(1,40) = 3.414$ $p = .072$ $r = .280$
Max. Handlenkmoment	$F(1,40) = .567$ $p = .456$ $r = .118$	$F(3,40) = 3.738$ $p = .019$	$F(1,40) = 18.756$ $p < .001$ $r = .564$
Min. Handlenkmoment	$F(1,40) = .113$ $p = .738$ $r = .053$	$F(3,40) = 53.323$ $p < .001$	$F(1,40) = .514$ $p = .478$ $r = .113$
Max. Gierrate	$F(1,40) = .629$ $p = .432$ $r = .124$	$F(3,40) = .612$ $p = .611$	$F(1,40) = 25.320$ $p < .001$ $r = .623$
Min. Gierrate	$F(1,40) = .13.517$ $p = .001$ $r = .503$	$F(3,40) = .533$ $p = .662$	$F(1,40) = 13.916$ $p < .001$ $r = .508$
Max. Lenkradwinkel	$F(1,40) = .374$ $p = .544$ $r = .096$	$F(3,40) = .236$ $p = .871$	$F(1,40) = 18.800$ $p < .001$ $r = .565$
Min. Lenkradwinkel	$F(1,40) = 1.751$ $p = .193$ $r = .205$	$F(3,40) = .700$ $p = .557$	$F(1,40) = 17.107$ $p < .001$ $r = .547$
TTC bei Fahrzeugreaktion	$F(1,40) = 3.905$ $p = .059$ $r = .298$	$F(3,35) = 3.683$ $p = .025$	$F(1,35) = .177$ $p = .677$ $r = .066$
SBFV-Urteil	$U = 255.000$ $z = -.693$ $p = .488$	$H(3) = 4.265$ $p = .234$	$U = 283.500$ $z = -.094$ $p = .925$

Tabelle 39: Faktor Assistenz - post-hoc t-Tests

Versuchsparameter Vergleich Assistenz	Max. Handlenkmo- ment	Min. Handlenkmo- ment	TTC bei Fahrzeugre- aktion
Keine Assistenz - Ausweichempfehlung	$t(22) = .797,$ $p = .434, r = .167$	$t(22) = 5.549,$ $p < .001, r = .764$	$t(21) = -4.674,$ $p < .001, r = .706$
Keine Assistenz - Führung	$t(22) = -2.481,$ $p = .021, r = .475$	$t(22) = 7.402,$ $p < .001, r = .845$	$t(18) = -2.894,$ $p = .010, r = .525$
Keine Assistenz - Führung + Ton	$t(22) = -.932,$ $p = .361, r = .195$	$t(22) = 7.725,$ $p < .001, r = .855$	$t(20) = -3.287,$ $p = .004, r = .574$
Ausweichempfehlung - Führung	$t(22) = 3.332,$ $p = .003, r = .579$	$t(22) = -3.788,$ $p = .001, r = .628$	$t(19) = -2.074,$ $p = .052, r = .429$
Ausweichempfehlung - Führung + Ton	$t(22) = 1.458,$ $p = .159, r = .297$	$t(22) = -4.073,$ $p = .001, r = .656$	$t(21) = -1.834,$ $p = .081, r = .372$
Führung - Führung + Ton	$t(22) = -1.024,$ $p = .317, r = .213$	$t(22) = .162,$ $p = .873, r = .034$	$t(18) = .262,$ $p = .796, r = .061$

Tabelle 40: Faktor Prüfumgebung: Korrelationen zwischen VIL und Realfahrzeug

	Korrelation		Korrelation
Min. Abstand zum Querverkehr	$r(36) = .975$ $p < .001$	Max. Gierrate	$r(36) = .402$ $p = .005$
Max. Querversatz	$r(36) = .486$ $p < .001$	Min. Gierrate	$r(36) = .619$ $p < .001$
Min. Querschleunigung	$r(36) = .694$ $p < .001$	Max. Lenkradwinkel	$r(36) = .361$ $p = .013$
Max. Querschleunigung	$r(36) = .455$ $p = .001$	Min. Lenkradwinkel	$r(36) = .366$ $p = .011$
Max. Verzögerung	$r(36) = .618$ $p < .001$	TTC bei Fahrzeugreaktion	$r(36) = .518$ $p < .001$
Max. Handlenkmoment	$r(36) = .594$ $p < .001$	SBFV-Urteil	$r_s(36) = .369$ $p = .010$
Min. Handlenkmoment	$r(36) = .781$ $p < .001$		

d) Testfall 3

Tabelle 41: t-Tests für unabhängige Stichproben (Realfahrzeug - VIL) und einfaktorielles Varianzanalyse (Assistenz)

Versuchsparameter	Realfahrzeug - VIL	Assistenz
Maximaler Querversatz	$t(46) = -.491,$ $p = .626, r = .072$	$F(2,45) = 1.976,$ $p = .150$
Maximale Querbeschleunigung	$t(46) = .917,$ $p = .364, r = .134$	$F(2,45) = .317,$ $p = .730$
Minimale Querbeschleunigung	$t(46) = -2.950,$ $p = .005, r = .399$	$F(2,45) = 2.729,$ $p = .076$
Maximale Verzögerung	$t(46) = 1.070,$ $p = .290, r = .156$	$F(2,45) = .098,$ $p = .907$
Handlenkmoment maximal	$t(46) = -1.314,$ $p = .195, r = .165$	$F(2,45) = 8.763,$ $p = .001$
Handlenkmoment minimal	$t(46) = -.354,$ $p = .725, r = .052$	$F(2,45) = 10.525,$ $p < .001$
Gierrate maximal	$t(46) = 1.737,$ $p = .089, r = .248$	$F(2,45) = 1.301,$ $p = .282$
Gierrate minimal	$t(46) = -2.370,$ $p = .022, r = .329$	$F(2,45) = 1.815,$ $p = .151$
Lenkradwinkel maximal	$t(46) = 1.494,$ $p = .142, r = .215$	$F(2,45) = .741,$ $p = .482$
Lenkradwinkel minimal	$t(46) = -2.817,$ $p = .007, r = .384$	$F(2,45) = 1.700,$ $p = .194$
SBFV-Urteil	$U = 226.500, z = -1.295,$ $p = .195, r = -.187$	$H(2) = 2.340,$ $p = .310$

Tabelle 42: Faktor Assistenz - post-hoc- t-Tests

Versuchsparameter Vergleich Assistenz	Max. Handlenk-moment	Min. Handlenk-moment
Lenkmoment - Führung	$t(30) = -4.001,$ $p < .001, r = .589$	$t(30) = -4.396,$ $p < .001, r = .625$
Lenkmoment - Führung + Ton	$t(30) = -1.907,$ $p = .066, r = .329$	$t(30) = -3.843,$ $p = .001, r = .574$
Führung - Führung + Ton	$t(30) = 2.293,$ $p = .029, r = .386$	$t(30) = .478,$ $p = .636, r = .090$

Tabelle 43: Korrelationen zwischen VIL und Realfahrzeug

	Korrelation		Korrelation
Max. Querversatz	$r(24) = .980$ $p < .001$	Max. Gierrate	$r(24) = .976$ $p < .001$
Min. Querbeschleunigung	$r(24) = .968$ $p < .001$	Min. Gierrate	$r(24) = .936$ $p < .001$
Max. Querbeschleunigung	$r(24) = .958$ $p < .001$	Max. Lenkradwinkel	$r(24) = .965$ $p < .001$
Max. Verzögerung	$r(24) = .893$ $p < .001$	Min. Lenkradwinkel	$r(24) = .971$ $p < .001$
Max. Handlenkmoment	$r(24) = .984$ $p < .001$	SBFV-Urteil	$r_s(24) = .959$ $p < .001$
Min. Handlenkmoment	$r(24) = .951$ $p < .001$		

D Vermessung von Sichtwinkeln in VIL und Realfahrzeug

Vermessung Sichtwinkel Realfahrzeug

Auflösung	
Helligkeit	
HOF/VOF	
Winkelauflösung	
Höhe des Augpunkts im Raum	115 cm
Abstand Augpunkt - Leinwand	76 cm

Soll-Abstand (m)	Breite des Fahrzeugs (cm)	Höhe des Fahrzeugs (cm)	Verhältnis B/H	Fläche FZG (cm ²)	Höhe des Fahrzeugs ab AP (°)	Breite des Fahrzeugs ab AP (°)	Fzg-MP - SP (AP/LW)* (cm)
10	11	7,2	1,53	79,20	5,42	8,28	7,2
22	4,4	3,2	1,38	14,08	2,41	3,32	5,4
30	4	3	1,33	12,00	2,26	3,01	5,4
44	2,8	2	1,40	5,60	1,51	2,11	5,4
50	2,4	1,8	1,33	4,32	1,36	1,81	6
88	1,7	1,2	1,42	2,04	0,90	1,28	5,4

Vermessung Sichtwinkel VIL

Auflösung des HMD (nVIS nVisor ST50)	1280 x 1024 pixel
Helligkeit	30 fl = 102.78 cd/m ²
HOF/VOF	40°/32°
Winkelauflösung	1.9 arc-min/pixel
Höhe des Augpunkts im Raum	115 cm
Abstand Augpunkt - Leinwand	76 cm

Soll-Abstand (m)	Breite des Fahrzeugs (cm)	Höhe des Fahrzeugs (cm)	Verhältnis B/H	Fläche FZG (cm ²)	Höhe des Fahrzeugs ab AP (°)	Breite des Fahrzeugs ab AP (°)	Fzg-MP - SP (AP/LW)* (cm)
10	10,2	7	1,46	71,40	5,27	7,68	7,2
22	5,4	3,6	1,50	19,44	2,71	4,07	5,4
30	3,8	2,4	1,58	9,12	1,81	2,86	5,4
44	2,8	1,8	1,56	5,04	1,36	2,11	5,4
50	2,4	1,6	1,50	3,84	1,21	1,81	6
88	1,6	1,2	1,33	1,92	0,90	1,21	5,4