

Entwicklung und Evaluierung eines kooperativen Interaktionskonzepts an Entscheidungspunkten für die teilautomatisierte, manöverbasierte Fahrzeugführung

Vom Fachbereich Maschinenbau an der
Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Sebastian Geyer
aus München

Berichterstatter: Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner

Mitberichterstatter: Prof. Dr. phil. Klaus Bengler

Tag der Einreichung: 14. März 2013

Tag der mündlichen Prüfung: 21. Mai 2013

Darmstadt 2013

D 17

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Fahrzeugtechnik (FZD) der Technischen Universität Darmstadt. Die Inhalte dieser Dissertation wurden im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Forschungsprojekts „Conduct-by-Wire“ erarbeitet.

Ein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner, der mit kritischen Diskussionen, gestalterischen Freiräumen und Vertrauen in meine Person entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit und zu meiner persönlichen Entwicklung beigetragen hat.

Bei Herrn Prof. Dr. phil. Klaus Bengler bedanke ich mich herzlich sowohl für die Übernahme des Korreferats als auch für die hervorragende Zusammenarbeit in der Forschungskooperation „Kooperative Fahrzeugführung“. In diesem Zusammenhang gilt mein Dank allen Teilnehmern der in diesem Rahmen stattgefundenen Kolloquien für den offenen wissenschaftlichen Austausch.

Der DFG danke ich für die Förderung dieses hochinteressanten Forschungsprojekts. Dessen erfolgreiche Durchführung war durch die vielfältige Unterstützung durch die IPG Automotive GmbH geprägt, wofür ich mich recht herzlich bedanke.

Des Weiteren bedanke ich mich bei Stephan Hakuli, der durch seine wissenschaftlichen Arbeiten zu Conduct-by-Wire und durch seine fachliche Expertise in besonderem Maße zum Gelingen dieser Arbeit und als Bürokollege zu einer gelungenen Arbeitsatmosphäre beigetragen hat. Ebenso bedanke ich mich bei den Kollegen des Instituts für Arbeitswissenschaft (IAD) Benjamin Franz, Michaela Kauer und Michael Schreiber für die vertrauensvolle und fruchtbare Zusammenarbeit.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Mitarbeitern von FZD, einschließlich der Werkstätten und des Sekretariats, für die angenehme Zusammenarbeit sowie das oft freundschaftliche Arbeitsumfeld, das ich gerne in Erinnerung behalten werde. Mein Dank gilt auch den vielen Studenten, die durch ihre Arbeiten und wertvolle Diskussionen zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Nicht zuletzt danke ich ganz herzlich meiner Familie für die vielfältige Unterstützung in allen Lebenslagen. Insbesondere danke ich meinen Eltern für die mir gebotenen Entwicklungsfreiheiten und die Ermöglichung einer ausgezeichneten Ausbildung.

Meiner Freundin Nanja danke ich für ihre liebevolle und bewundernswerte Unterstützung sowie ihr bedingungsloses Verständnis in den letzten Jahren. Dieser Rückhalt war für das Gelingen der vorliegenden Arbeit entscheidend.

Sebastian Geyer

Darmstadt, März 2013

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen	VIII
Formelzeichen und Indizes	X
Kurzzusammenfassung	XII
1 Einleitung und Zielsetzung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Stand der Forschung und Technik	3
1.2.1 Begriffsdefinitionen	3
1.2.2 Assistierte Fahrzeugführung	5
1.2.3 Teilautomatisierte Fahrzeugführung	6
1.2.4 Hochautomatisierte Fahrzeugführung.....	8
1.2.5 Vollautomatisierte Fahrzeugführung.....	9
1.2.6 Bewertung und Fazit zum Stand der Forschung und Technik	10
1.3 Identifikation des Forschungsbedarfs und Beitrag dieser Arbeit	13
1.3.1 H-Mode	13
1.3.2 Conduct-by-Wire.....	15
1.3.3 Forschungsziele und -methodik	18
2 Anforderungsanalyse	21
2.1 Szenarienidentifikation.....	21
2.1.1 Stand der Forschung und Technik.....	21
2.1.2 Entwicklung eines CbW-Szenarienkatalogs	23
2.2 Fahrerverhalten an Entscheidungspunkten.....	27
2.2.1 Verhaltensvorschriften gemäß Straßenverkehrsordnung.....	27
2.2.2 Der menschliche Entscheidungsprozess	27
2.2.3 Fahrerverhaltensanalysen.....	30
2.3 Fazit und Diskussion der Ergebnisse.....	31
3 Entwicklung des Interaktionskonzepts	32
3.1 Das Gate-Konzept	32
3.1.1 Ableitung von Systemausprägungen.....	34
3.1.2 Sicherheitskonzept	37
3.2 Anwendung des Gate-Konzepts auf den CbW-Szenarienkatalog	38
3.2.1 Gate-Identifikation und Analyse des Informationsbedarfs	39
3.2.2 Konsistenzanalyse.....	42
3.3 Fazit und Diskussion der Ergebnisse.....	44
4 Funktionsumfang der Automation	47
4.1 Integration des Gate-Konzepts in die CbW-Systemarchitektur.....	47
4.1.1 Gate-Steuerung.....	47

4.1.2	Gate-Annäherungsfunktion.....	48
4.1.3	Entscheidungsmodell.....	50
4.2	Einfluss der Gate-Annäherungsfunktion auf das Zeitpotential.....	51
4.2.1	Identifikation der Einflussparameter auf das Zeitpotential.....	53
4.2.2	Analytische Betrachtung.....	57
4.2.3	Zwischenfazit und Diskussion.....	58
4.3	Regelstrategien für die Gate-Annäherungsfunktion.....	59
4.3.1	Identifikation möglicher Regelstrategien.....	59
4.3.2	Entwicklung der Regelstrategie „Signalverzögerung“.....	64
4.4	Fazit und Diskussion der Ergebnisse.....	68
5	Maschinelle Umfeldwahrnehmung.....	70
5.1	Analyse des Entscheidungsprozesses.....	70
5.2	Anforderungsanalyse.....	72
5.2.1	Szeneriewissen.....	73
5.2.2	Gate-Lokalisierung.....	74
5.2.3	Kontextwissen.....	74
5.3	Stand der Technik und Forschung maschinelle Umfeldwahrnehmung.....	83
5.3.1	Radarsensorik.....	83
5.3.2	Lidarsensorik.....	84
5.3.3	Kamerasysteme.....	85
5.3.4	3D-ToF.....	87
5.3.5	Ultraschallsensorik.....	87
5.3.6	Digitale Karten.....	88
5.3.7	Sensorfusion.....	88
5.3.8	Zusammenfassung.....	89
5.4	Bewertung der technischen Realisierbarkeit.....	90
5.5	Fazit und Diskussion der Ergebnisse.....	93
6	Evaluierung des Gate-Konzepts.....	96
6.1	Untersuchungshypothesen.....	96
6.2	Untersuchungswerkzeug.....	99
6.3	Integration des Gate-Konzepts.....	100
6.3.1	Softwaretechnische Realisierung.....	100
6.3.2	MMS-Entwicklung: Anzeigeelement.....	102
6.3.3	MMS-Entwicklung: Bedienelement.....	105
6.4	Versuchsdesign.....	106
6.4.1	Probandenkollektiv.....	106
6.4.2	Versuchsszenarien.....	109
6.4.3	Subjektives Kritikalitätsmaß.....	111
6.4.4	Versuchsablauf.....	113
6.4.5	Probandenbefragung.....	115
6.5	Probandenverhalten.....	115

6.5.1	Kritikalitätsbewertung.....	116
6.5.2	Szenarienabsolvierung	118
6.5.3	Entscheidungszeit bei szenariogrechtem Verhalten der Automation.....	119
6.5.4	Reaktionszeit bei nicht szenariogrechtem Verhalten der Automation	125
6.6	Subjektiver Systemeindruck	128
6.7	Fazit und Diskussion der Ergebnisse.....	133
7	Gesamtfazit und Ausblick	135
A	Szeneriekatalog.....	140
B	Verhaltensvorschriften an Entscheidungspunkten aus der StVO	145
C	Anwendung des Gate-Konzepts auf den CbW-Szenarienkatalog	147
D	Ermittlung der Anforderungen an die maschinelle Umfeldwahrnehmung.....	152
E	Evaluierung des Gate-Konzepts	156
	Literaturverzeichnis	164
	Eigene Veröffentlichungen	179
	Betreute studentische Arbeiten.....	182

Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
<i>ABS</i>	Anti-Blockier-System
<i>ACC</i>	Adaptive Cruise Control
<i>ADAS</i>	Advanced Driver Assistance Systems
<i>AL</i>	Automation Level
<i>BASt</i>	Bundesanstalt für Straßenwesen
<i>CbW</i>	Conduct-by-Wire
<i>CMS</i>	Collision Mitigation System
<i>CT</i>	Cross Traffic (Querverkehr)
<i>DARPA</i>	Defense Advanced Research Projects Agency
<i>DFG</i>	Deutsche Forschungsgemeinschaft
<i>(D)GPS</i>	(Differential) Global Positioning System
<i>DLR</i>	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
<i>DIN</i>	Deutsches Institut für Normung
<i>E</i>	Entry (Einfahrt)
<i>ESP</i>	Elektronisches Stabilitätsprogramm
<i>F</i>	Front (vorne)
<i>FAS</i>	Fahrerassistenzsystem
<i>FZD</i>	Fachgebiet Fahrzeugtechnik, Technische Universität Darmstadt
<i>HAVEit</i>	Highly Automated Vehicles for Intelligent Transport
<i>HuD</i>	Head-up-Display
<i>I</i>	Intersection (Kreuzung)
<i>IAD</i>	Institut für Arbeitswissenschaft, Technische Universität Darmstadt
<i>L</i>	Left (links)
<i>LCDA</i>	Lane Change Decision Aid
<i>LIDAR</i>	Light Detection and Ranging
<i>LKS</i>	Lane Keeping Support
<i>LR</i>	Long range (Fernbereich)
<i>MMS</i>	Mensch-Maschine-Schnittstelle
<i>MR</i>	Mid range (Mittlerer Entfernungsbereich)
<i>OLG</i>	Oberlandesgericht
<i>PC</i>	Personal Computer
<i>PT</i>	Parallel Traffic (Längsverkehr)
<i>R</i>	Roundabout (Kreisverkehr), right (rechts)
<i>RADAR</i>	Radio Detection and Ranging
<i>RAS</i>	Richtlinie für die Anlage von Straßen
<i>RAS-K</i>	Richtlinie für die Anlage von Straßen, Teil: Knotenpunkte
<i>RASt</i>	Richtlinie für die Anlage von Stadtstraßen
<i>RiLSA</i>	Richtlinie für Lichtsignalanlagen
<i>RMS</i>	Richtlinie für die Markierung von Straßen

<i>RWTH</i>	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule
<i>SA</i>	Situation Awareness
<i>SD</i>	Standard Deviation (Standardabweichung)
<i>SPARC</i>	Secured propulsion using Advanced Redundant Control
<i>SR</i>	Short range (Nahbereich)
<i>StVO</i>	Straßenverkehrsordnung
<i>T</i>	Turn (Wenden)
<i>Tcl</i>	Tool command language
<i>ToF</i>	Time-of-flight
<i>TTG</i>	Time-to-Gate
<i>TTI</i>	Time-to-Intersection
<i>TTS</i>	Time-to-safety-corridor
<i>UML</i>	Unified Modeling Language
<i>VIAC</i>	VisLab Intercontinental Autonomous Challenge
<i>VPN</i>	Versuchspersonennummer
<i>VRS</i>	Verkehrsrechtssammlung
<i>WÜ</i>	Wiener Übereinkommen über den Straßenverkehr der Vereinten Nationen

Formelzeichen und Indizes

Symbol	Einheit	Beschreibung
a	m/s ²	Beschleunigung
d	m	Abstand
D	m/s ²	Verzögerung, Verzögerungsstufe
f	-	Kammerkonstante
H	m	Höhe
k	-	Anzahl der Merkmale
n	-	Anzahl, Stichprobengröße
N	-	Merkmalsausprägung
p	-, %	Wahrscheinlichkeit
s	m	Strecke
R	m	Sensoreichweite, Radius
SF	-	Sicherheitsfaktor
t	s	Zeitpunkt
TTS	s	Time-to-safety-corridor
v	m/s, km/h	Geschwindigkeit
x	m	Position
Δ	diverse	Differenz, Fehler
τ	s	Zeitkonstante
ϕ	°, rad	Azimut

Index	Beschreibung
<i>A</i>	Annäherungsmanöver
<i>BG</i>	Between gates (zwischen zwei Gates)
<i>Creep</i>	Creep (Kriechen)
<i>D</i>	Detektion
<i>E</i>	Entscheidung
<i>EB</i>	Emergency braking (Notbremsung)
<i>ego</i>	Ego-Fahrzeug
<i>fl</i>	Front left (vorne links)
<i>G, Gate</i>	Gate
<i>GE</i>	Gate entry (Einfahrt in ein Gate)
<i>i</i>	Index
<i>Intersection</i>	Kreuzung
<i>kritisch</i>	kritisch
<i>KP</i>	Kollisionspunkt
<i>max</i>	Maximum, maximal
<i>min</i>	Minimum, minimal
<i>ME</i>	Maneuver execution (Manöverausführung)
<i>RASt</i>	Gemäß der Richtlinie für die Anlage von Stadtstraßen
<i>req</i>	Required (erforderlich)
<i>S</i>	Sicherheitskorridor
<i>SB</i>	Signal Braking (Signalverzögerung)
<i>set</i>	set (gewählt)
<i>Step</i>	Stepwise Braking (stufenweise Verzögerung)
<i>TB</i>	Target Brake (Zielbremsung)
<i>Object, obj</i>	Objekt
<i>V</i>	Vehicle (Fahrzeug)
<i>x</i>	in x-Richtung (entspricht Fahrzeug-Longitudinalrichtung)
<i>y</i>	in y-Richtung (entspricht Fahrzeug-Lateralrichtung)

Kurzzusammenfassung

Die Fahrzeugführung ist eine komplexe Aufgabe für den menschlichen Fahrer. Die Automatisierung der Fahrzeugführungsaufgabe stellt daher seit dem Beginn der Automobilgeschichte ein technisches Bestreben dar. Moderne Fahrerassistenzsysteme haben hierbei einen bislang nicht gekannten Standard hinsichtlich Fahrkomfort und Sicherheit etabliert. Allerdings sind neben diesen positiven Auswirkungen auch negative Aspekte einer zunehmenden Automatisierung in Form zunehmender Komplexität durch Kombination mehrerer Assistenzsysteme erkennbar. Zudem ist eine vollständige Automatisierung aufgrund der aktuellen rechtlichen Rahmenbedingungen nicht zulässig. Einen vielversprechenden Ansatz zur Lösung dieses Konflikts stellen teilautomatisierte Fahrzeugführungskonzepte dar, die den menschlichen Fahrer und die Automation in einer, wie bei dem manöverbasierten Fahrzeugführungskonzept Conduct-by-Wire (CbW), kooperativen Interaktion vereinen. Erste wissenschaftliche Untersuchungen zu CbW zeigen vielversprechende Ergebnisse hinsichtlich der Akzeptanz durch potentielle Nutzergruppen und der technischen Realisierbarkeit. Bisherige Betrachtungen konzentrieren sich jedoch auf die grundlegende Interaktion einer Manöverbeauftragung durch den Fahrer und einer Manöverausführung durch die Automation.

Gegenstand dieser Arbeit ist die Untersuchung der Fragestellung, ob eine kooperative Interaktion zwischen Fahrer und Automation zur Entscheidungsfindung hinsichtlich der Ausführbarkeit von Fahrmanövern im Kontext der teilautomatisierten, manöverbasierten Fahrzeugführung darstellbar ist. Das Ziel dieser Arbeit besteht somit in der Entwicklung eines Interaktionskonzepts, das die Anforderungen des Fahrers und der Automation gleichermaßen berücksichtigt, sowie der Untersuchung dessen technischer Realisierbarkeit.

Der in dieser Arbeit gewählte Top-down-Ansatz beginnt mit grundlegenden Betrachtungen auf der Systemebene. Hierzu zählen die Ermittlung der zu erfüllenden Anforderungen, wie die Identifikation repräsentativer Szenarien, einzuhaltende verhaltensrechtliche Vorschriften sowie Anforderungen des Fahrers an eine kooperative Interaktion. Das Ergebnis einer hierauf basierenden Konzeptentwicklung ist das sogenannte „Gate-Konzept“, das aus einer Segmentierung der Manöverausführung in Form zu passierenden Entscheidungspunkte, den „Gates“, besteht. Aus dieser Konzeptidee werden drei Systemausprägungen abgeleitet, die sich durch den realisierten Automationsgrad und somit durch den Assistenzgrad bei der Entscheidungsfindung unterscheiden. Zudem wird das entwickelte Interaktionskonzept durch ein Sicherheitskonzept erweitert, das das Fahrzeug im Falle einer ausbleibenden Entscheidung der beiden Interaktionspartner, Fahrer oder Automation, in einen sicheren Zustand, dem Stillstand am Gate, überführt.

Grundlegende Betrachtungen zur Realisierbarkeit des Gate-Konzepts zeigen, dass sich dieses auf 400 repräsentative Szenarien theoretisch anwenden lässt. So sind die Position der Gates sowie der den Gates zugewiesene Informationsbedarf stets eindeutig definierbar.

Der zweite Teil der Arbeit befasst sich mit der Konkretisierung des entwickelten Interaktionskonzepts auf der Funktionsebene in Form einer regelungstechnischen Funktionsentwicklung sowie der Ermittlung der Anforderungen an die maschinelle Umfeldwahrnehmung. Hinsichtlich der regelungstechnischen Entwicklung kann gezeigt werden, dass sich der bisherige Entwicklungsstand der CbW-Systemarchitektur um eine Gate-Steuerung erweitern lässt, die kompatibel zu möglichen Funktionserweiterungen ist. Die Entwicklung des Regelverhaltens der Automation orientiert sich primär an den identifizierten Anforderungen des menschlichen Fahrers an den Entscheidungsprozess. Hierbei fließen wissenschaftliche Erkenntnisse zum menschlichen Entscheidungsprozess und aus Fahrerhaltensuntersuchungen an Entscheidungspunkten ein. Der zweite Schwerpunkt der Untersuchung der technischen Realisierbarkeit des Gate-Konzepts besteht in einer systematischen Identifikation der sich für die unterschiedlichen Systemausprägungen ergebenden Anforderungen an die maschinelle Umfeldwahrnehmung sowie einer Bewertung deren Realisierbarkeit durch einen Abgleich mit dem heutigen Stand der Forschung und Technik. Diese Untersuchung zeigt, dass die für alle Systemausprägungen grundlegenden Anforderungen darstellbar sind. Einschränkungen ergeben sich jedoch hinsichtlich des aus dem Kontextwissen abgeleiteten Informationsbedarfs.

Abschließend erfolgt die Integration des entwickelten Konzepts in einen statischen Fahrsimulator zur Untersuchung der Gebrauchstauglichkeit im Rahmen einer Studie mit 42 Probanden. Das Ziel der Untersuchung besteht in der zur technischen Bewertung ergänzenden Konzeptbewertung durch potentielle Nutzer. Neben der softwaretechnischen Umsetzung geht diesem Schritt eine prototypische Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle in Form eines Anzeige- und Bedienkonzepts voraus. Die Untersuchung erfolgt anhand repräsentativer Kreuzungsszenarien innerhalb geschlossener Ortschaften. Hierbei zeigen sich statistisch nachweisbare Unterschiede zwischen den untersuchten Systemausprägungen hinsichtlich der sicheren Absolvierung der Szenarien, der erforderlichen Entscheidungszeit und der Reaktionszeit bei nicht szenario-gerechtem Verhalten der Automation. Die subjektive Beurteilung fällt insgesamt positiv aus, wobei eine Tendenz zu schlechteren Bewertungen mit steigendem Automationsgrad erkennbar ist.

Die Ergebnisse dieser Arbeit liefern einen Beitrag zur Untersuchung der technischen Realisierbarkeit einer teilautomatisierten, kooperativen Fahrzeugführung nach dem Conduct-by-Wire-Konzept. Zudem bilden sie die Grundlage für die Übertragung des CbW-Konzepts auf Knotenpunktszenarien und somit auf, im Vergleich zu bisherigen Untersuchungen komplexere innerstädtische Szenarien.

1 Einleitung und Zielsetzung

1.1 Motivation

Die Fahrzeugführung stellt eine komplexe Aufgabe für den menschlichen Fahrer dar, die sich aus der zu bewältigenden Regelaufgabe der Fahrzeugführung und aus der permanenten Überwachungsaufgabe der eigenen Fahrzeugbewegung und des Fahrzeugumfelds ergibt. Die schrittweise Automatisierung der Fahrzeugführung und somit die Entlastung des menschlichen Fahrers von dieser Aufgabe wurde bereits 1918 von Claudy¹ als erstrebenswertes und zu verfolgendes Ziel von Forschung und Technik beschrieben. Claudy beschreibt seine Vision des „Motor car of the future“ folgendermaßen:

“Driving will be done from a small control board, which can be held in the lap. It will be connected to the mechanism by a flexible electric cable. A small finger lever, not a wheel, will guide the car. Another will attend to speed changes, buttons will light and warm the car, blow the horn, apply the brakes – everything. The driver will sit right or left as he pleases or even, on country roads, on the rear seat. Driving will be, then, what it ought to be, a mental, not a physical, exercise.”

Claudy formuliert dieses Ziel zu einer Zeit, in der die Geschichte des Automobils noch jung ist² und frei programmierbare Rechner oder gar elektronische Steuergeräte, mit denen dieses Ziel hätte realisiert werden können, noch gänzlich unbekannt sind.

Seit den Ausführungen von Claudy wurde das Ziel der Automatisierung der Fahrzeugführungsaufgabe in unterschiedlichen Ausprägungen verfolgt. Die Grundlage hierfür bildet häufig eine Analyse und Strukturierung der Fahrzeugführungsaufgabe des menschlichen Fahrers in Form von Fahrermodellen³. Donges⁴ beschreibt in seiner viel zitierten und für die Klassifizierung von Systemen zur Automatisierung der Fahrzeugführung geeigneten Drei-Ebenen-Hierarchie der Fahraufgabe die verschiedenen Interaktionsebenen zwischen Fahrer, Fahrzeug und Umwelt. Gemäß dieser Modellvorstellung kann die Fahrzeugführung durch drei kaskadierte Regelkreise dargestellt werden. Auf der höchsten Ebene, der Navigationsebene, erfolgt die Planung und gegebenenfalls

¹ Claudy (1918): The Motor Car of the Future, S.28

² Die Patentanmeldung (Reichspatent 37435) des Motorwagens am 29.01.1886 durch Carl Benz gilt gemeinhin als Beginn der Entwicklung des modernen Automobils.

³ Einen Überblick bieten beispielsweise Willumeit et al. (1999): Fahrermodelle - ein kritischer Überblick und Ranney (1994): Models of driving behavior: a review of their evolution

⁴ Donges (1982): Aspekte der aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen

Modifikation der Route. Auf der nächsten Ebene, der Bahnführungsebene, wird die Umsetzung der Route in Form von Fahrmanövern und Trajektorien geplant. Letztere bedarf zudem einer situationsabhängigen Wahl des gewünschten Betriebspunktes in Form von Geschwindigkeit, Abstand, Fahrstreifen und Ausrichtung innerhalb des Fahrstreifens. Hieraus folgen die Sollwerte für die Stabilisierungsaufgabe, welche in der Minimierung der Abweichung der Differenz zwischen aktueller und geplanter Trajektorie besteht. Bei der heutigen, konventionellen Fahrzeugführung, erfolgt die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion, wie in dem rechten Teil von Abbildung 1-1 dargestellt, hauptsächlich auf dieser untersten Ebene, der Stabilisierungsebene.

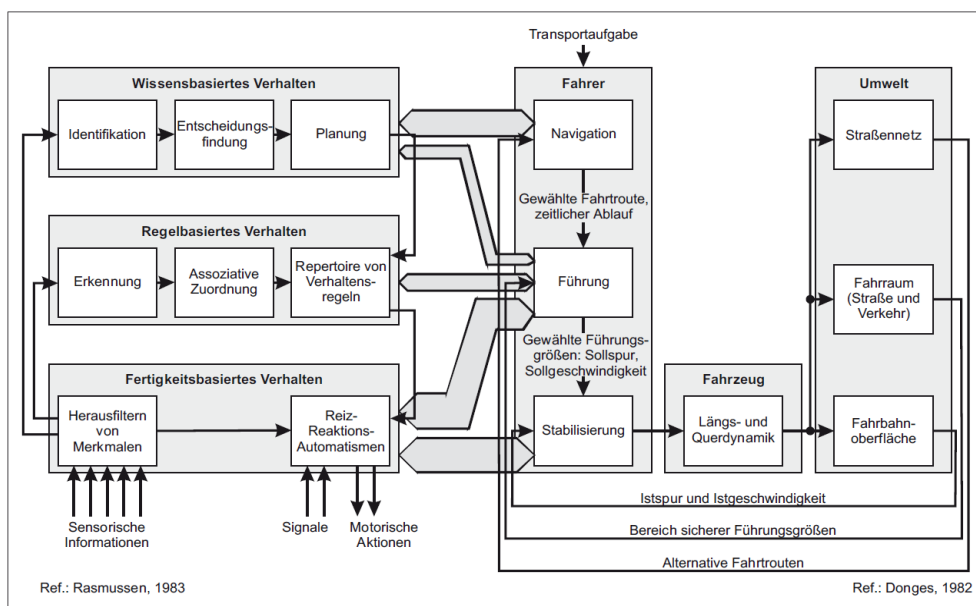


Abbildung 1-1: Drei-Ebenen-Modelle nach Rasmussen und Donges⁵

Dem Modell nach Donges lässt sich das allgemein auf die menschliche Arbeit anwendbare Drei-Ebenen-Modell für zielgerichtete Tätigkeiten nach Rasmussen⁶ für die zielgerichtete Tätigkeit der Fahrzeugführung gegenüberstellen. Dieses Modell unterscheidet drei Ebenen unterschiedlicher, kognitiver Beanspruchung des Menschen. Auf der obersten, der „wissensbasierten Verhaltensebene“ („knowledge-based behaviour“), spielt der Mensch basierend auf vorhandenem oder noch zu erwerbendem Wissen verschiedene Handlungsalternativen durch, wählt eine aus und speichert diese eventuell als Regel für zukünftige Entscheidungen ab. Auf der nächsten Ebene des „regelbasierten Verhaltens“ („rule-based behaviour“) greift der Mensch auf ein Repertoire an gespeicherten und sich

⁵ Donges (2012): Fahrerhaltensmodelle, S. 15 basierend auf Rasmussen (1983): Skills, Rules, and Knowledge; Signals, Signs, and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models und Donges (1982): Aspekte der aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen

⁶ Rasmussen (1983): Skills, Rules, and Knowledge; Signals, Signs, and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models

bewährten Verhaltensmustern zurück und greift auf die nach eigener Erfahrung effektivste Variante zurück. Die dritte Ebene des „fertigkeitbasierten Verhaltens“ („skill-based behaviour“) ist durch reflexartige Reiz-Reaktions-Mechanismen für routinemäßige Handlungsabläufe gekennzeichnet. Die Verbindung der Verhaltensebenen nach Rasmussen zu den Ebenen der Fahrzeugführung nach Donges sind in Abbildung 1-1 dargestellt. Die Zuordnung hängt hierbei von der Erfahrung des Fahrers ab. So lässt sich für die verschiedenen Teilaufgaben der Fahrzeugführung eine Entwicklung von der wissensbasierten bis hin zur fertigkeitbasierten Verhaltensebene mit zunehmender Fahrerfahrung feststellen⁷.

Der folgende Abschnitt gibt einen Überblick über den heutigen Stand der Forschung und Technik in dem Bereich der Fahrzeugautomatisierung unter Bezugnahme auf die vorgestellten Modellvorstellungen. Zudem wird der Fokus dieser Arbeit, die teilautomatisierte, kooperative, manöverbasierte Fahrzeugführung, in diesen Kontext eingeordnet.

1.2 Stand der Forschung und Technik

1.2.1 Begriffsdefinitionen

In den letzten Jahrzehnten haben sich in der wissenschaftlichen Gemeinschaft verschiedene, meist mit unterschiedlicher Bedeutung angewandte Begriffe zur Beschreibung von Automationsgraden der Fahrzeugführung etabliert. Einen Beitrag zur Strukturierung liefert eine Projektgruppe von Vertretern aus Industrie und Forschung unter der Leitung der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt). Die in Abbildung 1-2 dargestellte Klassifizierung unterscheidet den Automationsgrad hinsichtlich der von der Automation übernommenen Teilaufgaben der Fahrzeugführung und der beim Fahrer verbleibenden Überwachungsaufgabe. Zudem wird die Einsatzdauer als weiteres Unterscheidungsmerkmal herangezogen. Diese Klassifikation ermöglicht eine rechtliche Bewertung, das eigentliche Ziel der Projektgruppe, der einzelnen Systemausprägungen. Diese Nomenklatur unterscheidet fünf Automationsgrade der Fahrzeugführung. Ausgehend von „Driver Only“, in dem kein aktiver Eingriff durch die Automation in die Längs- oder Querführung erfolgt, besteht die niedrigste Automationsstufe „Assistiert“ in einer durch die Automation ausgeführten Längs- oder Querführung des Fahrzeugs bei gleichzeitiger Übernahme der komplementären Fahrzeugführungsaufgabe und permanenter Überwachung durch den Fahrer. In der nächsthöheren Kategorie „Teilautomatisiert“ übernimmt die Automation die Längs- und die Querführung des Fahrzeugs, wobei die Überwachungsaufgabe weiterhin beim Fahrer verbleibt. Zudem wird davon ausgegangen, dass

⁷ Donges (2012): Fahrerverhaltensmodelle, S.17

der Fahrer permanent in der Regelschleife („in the loop“) ist und die Fahrzeugführungsaufgabe jederzeit von der Automation übernehmen kann. Systeme der Kategorie „Hochautomatisiert“ und „Vollautomatisiert“ unterscheiden sich zu dieser Kategorie im Wesentlichen dadurch, dass die Übernahme durch den Fahrer erst nach einer gewissen Zeitreserve erfolgen muss beziehungsweise im Falle der Vollautomatisierung nicht zwingend erforderlich ist. Der Nachteil in der starken Einschränkung der Systemausprägungen besteht jedoch nach eigener Angabe der Projektgruppe darin, dass nicht alle denkbaren Varianten zukünftiger Systemgestaltung erfasst werden⁸. Zudem werden Systeme, die nicht aktiv in die Fahrzeugführung eingreifen, sondern den Fahrer informieren oder warnen, nicht von dieser Nomenklatur abgedeckt.

Benennung und Klassifizierung automatisierter Fahrfunktionen (nicht abschließend)		
		Stand: 06.09.2010
Nomenklatur	Beschreibung Automatisierungsgrad und Erwartung des Fahrers	beispielhafte Systemausprägung
Driver Only	Fahrer führt dauerhaft (während der gesamten Fahrt) die Längsführung (Beschleunigen / Verzögern) und die Querführung (Lenken) aus.	Kein in die Längs- oder Querführung eingreifendes (Fahrerassistenz-)System aktiv
Assistiert	Fahrer führt dauerhaft entweder die Quer- oder die Längsführung aus. Die jeweils andere Fahraufgabe wird in gewissen Grenzen vom System ausgeführt. <ul style="list-style-type: none"> ▪ Der Fahrer muss das System dauerhaft überwachen ▪ Der Fahrer muss jederzeit zur vollständigen Übernahme der Fahrzeugführung bereit sein 	Adaptive Cruise Control: - Längsführung mit adaptiver Abstands- und Geschwindigkeitsregelung Parkassistent: - Querführung durch Parkassistent (Automatisches Lenken in Parklücken. Der Fahrer steuert die Längsführung.)
Teilautomatisiert	Das System übernimmt Quer- und Längsführung (für einen gewissen Zeitraum und/ oder in spezifischen Situationen). <ul style="list-style-type: none"> ▪ Der Fahrer muss das System dauerhaft überwachen ▪ Der Fahrer muss jederzeit zur vollständigen Übernahme der Fahrzeugführung bereit sein 	Autobahnassistent: - Automatische Längs- und Querführung - Auf Autobahnen bis zu einer oberen Geschwindigkeitsgrenze - Fahrer muss dauerhaft überwachen und bei Übernahmeaufforderung sofort reagieren
Hochautomatisiert	Das System übernimmt Quer- und Längsführung für einen gewissen Zeitraum in spezifischen Situationen. <ul style="list-style-type: none"> ▪ Der Fahrer muss das System dabei nicht dauerhaft überwachen ▪ Bei Bedarf wird der Fahrer zur Übernahme der Fahraufgabe mit ausreichender Zeitreserve aufgefordert ▪ Systemgrenzen werden alle vom System erkannt. Das System ist nicht in der Lage, aus jeder Ausgangssituation den risikominimalen Zustand herbeizuführen. 	Autobahn-Chauffeur: - Automatische Längs- und Querführung - Auf Autobahnen bis zu einer oberen Geschwindigkeitsgrenze - Fahrer muss nicht dauerhaft überwachen und nach Übernahmeaufforderung mit gewisser Zeitreserve reagieren
Vollautomatisiert	Das System übernimmt Quer- und Längsführung vollständig in einem definierten Anwendungsfall. <ul style="list-style-type: none"> ▪ Der Fahrer muss das System dabei nicht überwachen ▪ Vor dem Verlassen des Anwendungsfalles fordert das System den Fahrer mit ausreichender Zeitreserve zur Übernahme der Fahraufgabe auf ▪ Erfolgt dies nicht, wird in den risikominimalen Systemzustand zurückgeführt ▪ Systemgrenzen werden alle vom System erkannt, das System ist in allen Situationen in der Lage, in den risikominimalen Systemzustand zurückzuführen 	Autobahn-pilot: - Automatische Längs- und Querführung - Auf Autobahnen bis zu einer oberen Geschwindigkeitsgrenze - Fahrer muss nicht überwachen - Reagiert der Fahrer nicht auf eine Übernahmeaufforderung, so bremst das Fahrzeug in den Stillstand herunter.

Abbildung 1-2: Definition verschiedener Automatisierungsgrade nach BAST⁹

Im Hinblick auf den Fokus dieser Arbeit und die Darstellung des Standes der Forschung und Technik wird im Folgenden auf diese Nomenklatur zurückgegriffen. Die Darstellung des Standes der Forschung und Technik dient der wissenschaftlichen Einordnung

⁸ Gasser (2012): Ergebnisse der Projektgruppe Automatisierung: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung, S.2

⁹ Gasser et al. (2012): Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung, S. 9

des Themas dieser Arbeit und kann in den einzelnen Kategorien keine Vollständigkeit gewährleisten.¹⁰

1.2.2 Assistierte Fahrzeugführung

Moderne und heute am Markt verfügbare Fahrerassistenzsysteme (FAS)¹¹ werden mit dem Ziel der Erhöhung der Sicherheit und des Fahrkomforts entwickelt. Diese Systeme decken in ihrer heutigen Ausführung den Automationsgrad „assistiert“ ab. Zu den Sicherheitssystemen zählen Fahrdynamikregelsysteme wie ABS und ESP sowie Systeme, die Unfälle vermeiden oder deren Folgen lindern sollen, wie beispielsweise Frontalkollisionsschutzsysteme (kurz CMS: Collision Mitigation Systems), Spurhalteassistenten (kurz LKS: Lane Keeping Support) oder Fahrstreifenwechselassistenten (kurz LCDA: Lane Change Decision Aid). Vertreter aus der Gruppe der komforterhöhenden FAS sind meist dadurch gekennzeichnet, dass der Fahrer eine spezifische Teilaufgabe der Fahrzeugführung an die Automation delegiert. Hierzu zählen beispielsweise die Adaptive Cruise Control (ACC), die eine vom Fahrer gewählte Wunschgeschwindigkeit und eine Zeitlücke zu vorausfahrenden Fahrzeugen einregelt oder die verschiedenen Ausprägungen der Einparkassistenten. Diese Systeme übernehmen somit Teile der Fahrzeugführung auf der Stabilisierungs- und der Bahnführungsebene. Eine klare Trennung der Assistenzziele Sicherheit und Komfort ist dabei nicht immer eindeutig möglich und auch nicht zwingend erforderlich¹². Das am Markt verfügbare breite Angebot an modernen FAS wird zunehmend von Modellen der Ober- und oberen Mittelklasse auf die untere Mittel- und Kompaktklasse ausgeweitet¹³.

Ein häufig im Bereich der Forschung verfolgter Ansatz zur Optimierung der Funktionsqualität und somit zur Erhöhung der Nutzerakzeptanz existierender Systeme besteht in der Interpretation der Fahrerabsicht oder in der auf Fahrermodellen basierenden Systemparametrierung. Die Entwicklung neuer Systeme basiert einerseits auf der Kombination komplementärer Systeme, wie beispielsweise von ACC und LKS zu einer integrierten Längs- und Querführung, und andererseits auf der Identifikation von Assistenzpotential aus Unfalldaten. Beispiele für kurz vor der Markteinführung stehende Systeme

¹⁰ Einen detaillierteren Überblick bieten beispielsweise Winner et al. (2012): Handbuch Fahrerassistenzsysteme oder Bishop (2005): Intelligent vehicle technology and trends

¹¹ Im englischsprachigen Raum als ADAS (Advanced Driver Assistance Systems) bezeichnet

¹² Vgl. Winner et al. (2013): Maße für den Sicherheitsgewinn von Fahrerassistenzsystemen, S. 16

¹³ Beispielsweise in der aktuellen A-Klasse von Mercedes-Benz (vgl. Schopper et al. (2012): Radarbasierte Assistenzsysteme)

sind der Stau- oder der Baustellenassistent¹⁴ und für noch im Forschungsstadium befindliche Systeme der Überhol¹⁵- oder der Kreuzungsassistent¹⁶.

Ein neuer zu beobachtender Trend besteht zudem in der Erforschung und Entwicklung ressourcenschonender FAS. Die unterschiedlichen Konzepte, wie die an der RWTH Aachen entwickelte Advanced ACC¹⁷, verfolgen meist eine vorausschauende Parametrierung der Betriebsweise von FAS unter Einbeziehung erweiterter Umfeldinformationen des e-horizons¹⁸. Das Forschungsvorhaben eco₂DAS verfolgt einen Top-down-Ansatz zur Entwicklung einer generischen Architektur zur Darstellung ressourcenschonender FAS-Funktionalitäten basierend auf einem Informationsaustausch zwischen FAS- und Antriebsmanagement¹⁹.

1.2.3 Teilautomatisierte Fahrzeugführung

Während moderne FAS entweder die Längs- oder die Querführung eines Fahrzeugs über einen längeren Zeitraum übernehmen, ist die teilautomatisierte Fahrzeugführung dadurch gekennzeichnet, dass sowohl die Längs- als auch die Querführung auf der Bahnführungsebene durch die Automation ausgeführt werden. Die Verantwortung über die Fahrzeugführung verbleibt jedoch, wie bei der assistierten Fahrzeugführung, beim Fahrer. Die verschiedenen Ausprägungen der teilautomatisierten Fahrzeugführung lassen sich hinsichtlich der Art der Interaktion zwischen Fahrer und Automation unterscheiden.

Die auf einer reinen Delegation basierende Fahrzeugführung ist durch eine sequentielle Assistenz²⁰ gekennzeichnet, bei der der Fahrer und die Automation abwechselnd die Fahrzeugführung übernehmen. Demnach delegiert der Fahrer die Fahrzeugführung an die Automation, überwacht deren Ausführung und hält sich permanent für eine sofortige Übernahme der Fahrzeugführung bereit. Hierzu zählen die zuvor beschriebenen inte-

¹⁴ Hoeger et al. (2011): HAVEit Final report, S. 240

¹⁵ Hohm (2010): Umfeldklassifikation und Identifikation von Überholzielen für ein Überholassistentensystem

¹⁶ Klanner (2008): Entwicklung eines kommunikationsbasierten Querverkehrsassistenten im Fahrzeug und Mages (2009): Top-Down-Funktionsentwicklung eines Einbiege- und Kreuzenassistenten

¹⁷ Zlocki (2010): Vorausschauendes ACC zur Steigerung der Energieeffizienz von Hybridfahrzeugen

¹⁸ Kastner et al. (2011): Task-based environment interpretation and system architecture for next generation ADAS, S. 24

¹⁹ Korzenietz (2013): Requirement analysis for a universal system architecture for ecological and economical driver assistance systems

²⁰ Hakuli et al. (2012): Kooperative Automation, S. 642

grierten, durch Kombination existierender FAS für die Längs- und Querführung realisierten, Ansätze.

Die kooperative Fahrzeugführung²¹ verfolgt hingegen die Überführung des Konzepts der kooperativen Kontrolle nach Sheridan²² auf die automatisierte Fahrzeugführung. Wesentliches Kennzeichen der kooperativen Automation ist, dass beide Kooperationspartner, der Fahrer und die Automation, die Fahrzeugführungsaufgabe gemeinsam und simultan übernehmen. Beispiele der kooperativen Fahrzeugführung sind die in zwei von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Forschungsvorhaben untersuchten Konzepte Conduct-by-Wire (Technische Universität Darmstadt) und H-Mode (DLR Braunschweig, RWTH Aachen und Technische Universität München).

Die Idee von Conduct-by-Wire (CbW)²³ besteht darin, die Fahrzeugführung durch eine manöverbasierte Interaktion zwischen Fahrer und Automation von der Stabilisierungsebene auf die Bahnführungsebene anzuheben. Die konventionelle, kontinuierliche Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug auf der Stabilisierungsebene wird durch eine ereignisbasierte Kommunikation über Manöverbefehle auf der Bahnführungsebene ersetzt. Der Fahrer eines CbW-Fahrzeugs kommuniziert seine Manöverbefehle über eine Manöverschnittstelle, die zudem eine Parametrierung der gewählten Manöver sowie bei Bedarf eine Interaktion auf der Stabilisierungsebene ermöglicht. Das Konzept einer manöverbasierten Fahrzeugführung wird auch von Bayouth²⁴ theoretisch beschrieben, jedoch nicht weiter untersucht. Ein zu CbW vergleichbarer Ansatz wird von Glaser et al.²⁵ und Vanholme et al.²⁶ im Rahmen des Forschungsvorhabens HAVEit²⁷ für den Diskursbereich Autobahn und im Rahmen des Forschungsvorhabens Proreta an der Technischen Universität Darmstadt beschrieben und prototypisch realisiert²⁸.

²¹ Biester (2004): Der Einsatz von Kooperation zwischen Mensch und Maschine im Kraftfahrzeug oder Hakuli et al. (2012): Kooperative Automation

²² Sheridan (1992): Telerobotics, automation, and human supervisory control nach Biester (2004): Der Einsatz von Kooperation zwischen Mensch und Maschine im Kraftfahrzeug

²³ Conduct-by-Wire leitet setzt sich aus dem englischen Verb to conduct (führen, leiten, dirigieren) und dem sich ergebenden Potential zur Nutzung von by-Wire-Systemen ab. Das Konzept wurde erstmals von Winner und Heuss vorgestellt (vgl. Winner et al. (2005): X-by-Wire Betätigungselemente - Überblick und Ausblick)

²⁴ Bayouth et al. (1997): A Hybrid Human-Computer Autonomous Vehicle Architecture, S. 5

²⁵ Glaser et al. (2010): Maneuver-Based Trajectory Planning for Highly Autonomous Vehicles on Real Road With Traffic and Driver Interaction

²⁶ Vanholme et al. (2011): A Legal Safety Concept for Highly Automated Driving on Highways

²⁷ Hoeger et al. (2011): HAVEit Final report

²⁸ Bauer et al. (2012): PRORETA 3: An Integrated Approach to Collision Avoidance and Vehicle Automation

Der Betrachtungsschwerpunkt bei H-Mode²⁹ liegt auf einer durch die H(orse)-Metapher inspirierten haptisch-multimodalen Interaktion. Bei H-Mode werden das Beispiel des Reiters und seines Pferds auf die teilautomatisierte Fahrzeugführung übertragen und die Instanziierung der kooperativen Kontrolle mit Schwerpunkt auf der haptisch-multimodalen Kopplung zwischen Automation und Fahrer verfolgt. Während die Automation in dem assistierten Modus „tight rein“ nur einen geringen Einfluss auf die Fahrzeugführung hat, übernimmt sie diese größtenteils in dem teilautomatisierten Modus „loose rein“. Der Fahrer ist in jedem der beiden Automationsmodi permanent über eine aktive Schnittstelle mit dem Fahrzeug verbunden.

Das an der Technischen Universität München erforschte Konzept der Teleoperation³⁰ stellt im Kontext der teilautomatisierten Fahrzeugführung eine Sonderrolle dar. Bei diesem Konzept beauftragt ein Operator, der sich nicht in dem Fahrzeug befindet, auf der unteren Ebene der Bahnführungsebene die Ausführung von Trajektoriensegmenten an die Automation. Die Automation übernimmt auch in diesem Fall die Fahrzeuglängs- und -querführung, während die Verantwortung bei dem menschlichen Interaktionspartner verbleibt. Die Motivation der Teleoperation besteht in der automatisierten Führung von Fahrzeugen ohne Insassen, beispielsweise der Verlagerung von Mietwagen an einen anderen Standort. Es handelt sich demnach nicht um eine durch den Fahrer mit Unterstützung der Automation absolvierte Fahrmission.

1.2.4 Hochautomatisierte Fahrzeugführung

Während bei der Teilautomatisierung die permanente Verfügbarkeit des Fahrers zur Übernahme der Fahrzeugführungsaufgabe vorausgesetzt wird, unterscheiden sich hochautomatisierte Konzepte dadurch, dass hierfür eine gewisse Zeitreserve zugelassen wird. Hierbei wird der Fahrer durch eine geeignete Übernahmeaufforderung in die Handlungsschleife überführt. Ein Beispiel für ein derartiges Konzept ist der im Rahmen von HAVEit entwickelte Temporary Auto Pilot³¹, bei dem der Fahrer die Fahrzeugführung auf Bahnführungs- und Stabilisierungsebene vollständig an die Automation übergibt. Durch eine Fahrerzustandsbewertung wird die Aufmerksamkeit des Fahrers im Hinblick auf die ihm verbleibende Aufgabe der Systemüberwachung kontrolliert. Ein ähnlicher Ansatz wird in dem Forschungsvorhaben BMW Connected Drive³² verfolgt.

²⁹ Flemisch et al. (2003): The H-Metaphor as a guideline for vehicle automation and interaction

³⁰ Gnatzig et al. (2012): Die Teleoperation als Ansatz zur fahrerlosen Fahrzeugführung

³¹ Bartels et al. (2011): Hochautomatisiertes Fahren auf der Autobahn

³² Spannheimer et al. (2012): Hochautomatisiertes Fahren - Technologie und Herausforderung

1.2.5 Vollautomatisierte Fahrzeugführung

Im Falle der vollautomatisierten Fahrzeugführung erfolgt die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion hauptsächlich auf der Navigationsebene. Der Fahrer überträgt die unterlageren Schritte der Fahrzeugführung vollständig der Automation, welche die sichere Ausführung der Fahrmission garantieren muss. In diesem Falle hat die Automation jegliche Entscheidung selbst zu treffen, ohne auf den Fahrer, der entsprechend dem Konzept der vollautomatisierten Fahrzeugführung nicht in der Handlungsschleife ist, zurückgreifen zu können. Dies erfordert eine hohe Leistungsfähigkeit hinsichtlich der Perzeptions- und Kognitionsleistungsfähigkeit der maschinellen Umfeldwahrnehmung.

Die unterschiedlichen Systemausprägungen lassen sich hinsichtlich dem Anwendungsfokus und der von der Automation übernommenen Umfeldinterpretation unterteilen. So existieren beeindruckende Leistungsdemonstrationen im Bereich der vollautomatisierten Fahrzeugführung im fahrdynamischen Grenzbereich wie beispielsweise der BMW TrackTrainer³³ oder der Audi TTS Pikes Peak von Volkswagen und der Stanford University³⁴. Diese Systeme basieren auf einer vom System im Voraus erlernten und geplanten Trajektorie unter Verwendung hochgenauer Positionierungssysteme wie DGPS³⁵. Ähnliche Systeme werden auch im Bereich der Erprobung und Absicherung von Systemen, bei denen der menschlichen Fahrer von der physischen Belastung der Fahraufgabe durch die Automation entlastet wird, eingesetzt. Beispiele hierfür sind die von Hurich³⁶ und Jäger³⁷ beschriebenen Systeme.

Bei anderen Systemausprägungen, wie beispielsweise VIAC³⁸ der Universität Parma und dem auf die Bildung von Nutzfahrzeugkonvois mit geringen Fahrzeugabständen fokussierte Forschungsprojekt KONVOI³⁹, erfolgt die Fahrzeugführung basierend auf der über maschinelle Umfeldwahrnehmung bestimmten Trajektorie eines Führungsfahrzeugs. Im Gegensatz dazu existieren Systeme, die die Bahnführung situationsadaptiv und eigenständig auf der Basis von Daten der maschinellen Umfeldwahrnehmung

³³ Waldmann et al. (2010): Der BMW TrackTrainer - automatisiertes Fahren im Grenzbereich auf der Nürburgring Nordschleife

³⁴ Langer et al. (2012): Up to the Limits: Autonomous Audi TTS

³⁵ Differential Global Positioning System

³⁶ Hurich (2009): Koordiniertes Automatisiertes Fahren zum Entwickeln, Prüfen und Absichern von Assistenzsystemen

³⁷ Jäger (2009): Autonomes System für fahrerloses Testing

³⁸ VisLab Autonomous Intercontinental Challenge (vgl. Bertozzi et al. (2011): VIAC: an Out of Ordinary Experiment)

³⁹ Deutschle et al. (2009): Das KONVOI Projekt - Entwicklung und Untersuchung des Einsatzes von Lkw-Konvois

durchführen. Seit den ersten prototypischen Demonstrationen beispielsweise durch Dickmanns⁴⁰ nahm die Zahl der Prototypenfahrzeuge in den letzten Jahren stark zu. Neben den erzielten technischen Fortschritten waren Wettbewerbe wie die DARPA Challenges, in der letzten Ausgabe in Form der DARPA Urban Challenge⁴¹, Haupttreiber dieser Entwicklung. Während die Fahrzeuge bei diesen Wettbewerben in abgesperrten Bereichen operieren und zuvor definierte Fahraufgaben ausführen, wird in Projekten wie dem Google Self-Driving-Car⁴², dem Stadtpilot der Technischen Universität Braunschweig⁴³ oder AutoNOMOS⁴⁴ der Freien Universität Berlin die vollautomatisierte Fahrzeugführung im öffentlichen Straßenverkehr erforscht.

1.2.6 Bewertung und Fazit zum Stand der Forschung und Technik

Die Untersuchung der Auswirkungen der Automatisierung auf den Menschen stellt ein breites wissenschaftliches Feld dar. Einen Überblick über die Entwicklung in unterschiedlichen Anwendungsfeldern, die dabei gemachten Erfahrungen und abzuleitenden Maßnahmen für künftige Entwicklungen liefern beispielsweise Nof⁴⁵ und Christoffersen et al.⁴⁶. Auch die Frage nach der geeigneten Automationsstufe, beispielsweise nach der zehnstufigen Taxonomie von Sheridan und Verplank⁴⁷, wird vielfach untersucht. So kommen beispielsweise Moray et al.⁴⁸ zu dem Schluss, dass die Effektivität des Mensch-Maschine-Systems stark von der Komplexität, der Schwierigkeit und der Dynamik der zu kontrollierenden Aufgabe abhängt. Je nach erforderlicher Reaktionsgeschwindigkeit kann der Mensch als Entscheider hierbei geeignet oder ungeeignet sein.

⁴⁰ Dickmanns (1980): Untersuchungen und Arbeitsschritte zum Thema künstliche Intelligenz: Rechnersehen und -steuerung dynamischer Systeme nach Maurer (2000): Flexible Automatisierung von Straßenfahrzeugen mit Rechnersehen

⁴¹ Buehler et al. (2009): The DARPA Urban Challenge Autonomous Vehicles in City Traffic

⁴² Markoff (2010): Google Cars Drive Themselves, in Traffic

⁴³ Saust et al. (2011): Autonomous Vehicle Guidance on Braunschweig's Inner Ring Road within the Stadtpilot Project

⁴⁴ Wang et al. (2011): Action Annotated Trajectory Generation for Autonomous Maneuvers on Structured Road Networks

⁴⁵ Nof (2009): Automation: What It Means to Us Around the World

⁴⁶ Christoffersen et al. (2002): How to make Automated Systems Team Players

⁴⁷ Sheridan et al. (1978): Human and Computer Control of Undersea Teleoperators

⁴⁸ Moray et al. (2000): Adaptive Automation, Trust, and Self-Confidence in Fault Management of Time-Critical Tasks

Bekannte Automationsprobleme werden mit zunehmender Automatisierung auch für die Fahrzeugführung relevant. Hierzu zählen die negativen Auswirkungen auf das als „Situation Awareness“⁴⁹ bezeichnete Bewusstsein des Fahrers über die Situation, in der er sich gerade befindet oder die als „Mode Awareness“⁵⁰ bezeichnete Kenntnis des Fahrers über den Modus, in dem die Automation arbeitet. In diesem Bereich existieren verschiedene Untersuchungen zu den Auswirkungen der Automation auf die Fahraufgabe, das Fahrerverhalten und die Fahrsicherheit, wie beispielsweise die Studien von Hargutt et al.⁵¹ und Buld et al.⁵².

Neben diesen auf die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion bezogenen Auswirkungen werden die Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung, wie das bereits erwähnte Beispiel der gleichnamigen Projektgruppe der BASt zeigt, diskutiert. Zu diesem Bereich zählt beispielsweise die Beachtung des Wiener Übereinkommens über den Straßenverkehr von 1968, das von 64 Staaten der Vereinten Nationen ratifiziert wurde und das die Grundlagen der Verantwortung über die Fahrzeugführung regelt:

„Every driver shall at all times be able to control his vehicle or to guide his animals.”
(Art. 8 Abs. 5 WÜ)

„Every driver of a vehicle shall in all circumstances have his vehicle under control so as to be able to exercise due and proper care and to be at all times in a position to perform all manoeuvres required of him. [...]“
(Art. 13 Abs. 1 WÜ)

Zudem werden auch haftungsrechtliche Aspekte der Produkthaftung und der Haftung nach dem Straßenverkehrsgesetz diskutiert.

Unabhängig von den beschriebenen Auswirkungen auf den Fahrer und den, insbesondere für die Zulassung automatisierter Fahrzeuge relevanten rechtlichen Fragestellungen, haben moderne Fahrerassistenzsysteme einen bislang nicht gekannten Standard hinsichtlich Fahrkomfort und Sicherheit⁵³ etabliert. Der aktuelle Stand der Technik ermöglicht dem Fahrer zunehmend, Teilaufgaben der Fahrzeugführung an diese Systeme zu delegieren. Das Funktionsspektrum der Systeme nimmt dabei stetig zu und viele Systeme haben sich bereits im Kundeneinsatz bewährt. Dennoch werden die wissenschaftlich

⁴⁹ Endsley (1995): Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems

⁵⁰ Sarter et al. (1995): How in the World did we ever get into that mode? Mode Error and Awareness in Supervisory Control nach Hakuli et al. (2012): Kooperative Automation

⁵¹ Hargutt et al. (2001): Die Gefahr der Unterforderung? Selbstregulation der Aktivierung in der Fahrsimulation

⁵² Buld et al. (2002): Wirkungen von Assistenz und Automation auf Fahrerzustand und Fahrsicherheit

⁵³ Gwehenberger (2010): Sicherheitsgewinn durch Fahrerassistenzsysteme: Aktuelle Erkenntnisse aus Schadenakten der Allianz

nachgewiesenen Vorteile von FAS⁵⁴ durch einen wichtigen Nebeneffekt begleitet: die zunehmende Komplexität. Heute werden die meisten FAS getrennt voneinander entwickelt. Dies führt dazu, dass jedes System eine eigene Nutzerschnittstelle mit einem eigenen Interaktionskonzept aufweist. Diese zunehmende Komplexität widerspricht den ursprünglichen Zielen, den Komfort und die Sicherheit zu erhöhen. Die Interaktion ist bei heutigen Systemen wie der Adaptive Cruise Control (ACC) auf Fahrereingaben (beispielsweise die Wunschgeschwindigkeit) und Systeminformationen (beispielsweise Zielobjekt erkannt) beschränkt. Obwohl der Fahrer die longitudinale Fahrzeugführung an die Automation delegiert, hat er die Ausführung dieser Aufgabe permanent zu überwachen. Im Falle des Erreichens von Systemgrenzen oder bei nicht zufriedenstellender Ausführung der Assistenzfunktion muss der Fahrer eingreifen und die Fahraufgabe wieder übernehmen. Hierfür muss der Fahrer ein mentales Modell des Systemverhaltens entwickeln, das ihm eine Vorhersage des Systemverhaltens und somit eine rechtzeitige Reaktion ermöglicht. Ein sicherer Wechsel der Aufgabenverteilung zwischen Fahrer und Automation wird bei heutigen Systemen zudem dadurch erschwert, dass die Systeme nur aktiviert oder deaktiviert werden können und somit keine kontinuierlichen Übergänge möglich sind.

Die Forschung im Bereich der vollautomatisierten Fahrzeugführung hat, wie in dem vorherigen Abschnitt dargestellt, große Fortschritte erzielt. Jedoch verhindern zwei wesentliche Faktoren die Markteinführung derartiger Systeme. Hierzu zählt, im Gegensatz zu heutigen FAS⁵⁵, die Nichterfüllung gesetzlicher Regelungen wie dem Wiener Übereinkommen über den Straßenverkehr. Dies führt zu der Entwicklung von Systemen in einem bislang rechtlich noch nicht eindeutig geklärten Bereich, bei denen der Anwendungsfokus der vollautomatisierten Fahrzeugführung auf die Indisposition des menschlichen Fahrers beschränkt wird. Hierzu zählen System wie das im Rahmen des Forschungsprojekts SPARC entwickelte Sicherheitssystem⁵⁶ oder der von BMW entwickelte Nothalteassistent⁵⁷, der in einer gesundheitlichen Notfallsituation des Fahrers ein abgesichertes Nothaltemanöver vollautomatisiert durchführt. Zudem stellt der mögliche Freigabeprozess für vollautomatisierte Fahrzeuge im öffentlichen Straßenverkehr eine grundlegende und bislang nicht gelöste Herausforderung dar⁵⁸.

⁵⁴ Hummel et al. (2011): Advanced Driver Assistance Systems und Benmimoun et al. (2012): Wirkungsanalyse von ACC und FCW auf Grundlage von CAN-Daten im Rahmen eines Feldversuchs

⁵⁵ Kempen (2008): Fahrerassistenz und Wiener Weltabkommen und Frenz et al. (2009): Völkerrechtliche Zulässigkeit von Fahrerassistenzsystemen

⁵⁶ Holzmann (2008): Adaptive Cooperation between Driver and Assistant System

⁵⁷ Kämpchen et al. (2010): Umfelderkennung für den Nothalteassistenten - ein System zum automatischen Anhalten bei plötzlich reduzierter Fahrfähigkeit des Fahrers

⁵⁸ Winner et al. (2010): Freigabefälle des Autonomen Fahrens

Eine Lösung für die Problematik zunehmender Komplexität durch Kombination mehrerer Assistenzsysteme und einen wichtigen Schritt in Richtung vollautomatisierter Fahrzeugführung bieten teilautomatisierte Fahrzeugführungskonzepte. Während bei den auf einer reinen Delegation basierenden Konzepten die Probleme hinsichtlich der wechselnden Ausführung von Aufgaben zwischen Fahrer und Automation weiterhin bestehen, könnte dies durch die kooperative Bewältigung von Aufgaben und dem kontinuierlichen Übergang zwischen Unterstützungsgraden überwunden werden. Konzepte wie CbW oder H-Mode erfüllen zudem weiterhin die rechtlichen Grundlagen, da die Verantwortung über die Fahrzeugführung beim Fahrer verbleibt. Diese Einschätzung bestätigen Neuendorf et al.⁵⁹ in einer Betrachtung der Übertragbarkeit der Automatisierung bei der Führung von Flugzeugen auf die Anwendung im Automobilbereich. So führte die Automation in der Luftfahrt zu einer starken Reduzierung der durch den Menschen zu bewältigenden Aufgaben und zu einer gesteigerten Sicherheit, jedoch auch zu einer erhöhten Komplexität durch die Anzahl und Kopplung automatischer Funktionen. Die konventionelle Automatisierung von Routineaufgaben führt zu einem Verlust von Fertigkeiten bei der Crew und einer damit einhergehenden Unterforderung in weiten Funktionsbereichen sowie zu einer Überforderung bei der Problemlösung in Notfällen. Nach Neuendorf et al. stellt daher der sich in der Luftfahrt bewährte Ansatz der kooperativen Automation, die eine transparente und ebenenübergreifende Interaktion ermöglicht, einen vielversprechenden Ansatz für die Anwendung im Automobilbereich dar.

1.3 Identifikation des Forschungsbedarfs und Beitrag dieser Arbeit

Im Folgenden werden das H-Mode- und das Conduct-by-Wire-Konzept als Ausprägungen der teilautomatisierten, kooperativen Fahrzeugführung detailliert beschrieben. Zudem werden die auf den jeweiligen Konzepten basierenden weiterführenden Forschungsarbeiten als Grundlage für die Identifikation des Forschungsbedarfs dargestellt.

1.3.1 H-Mode

H-Mode basiert auf der Interaktionsmetapher „Reiter-Pferd“ mit dem Ziel der Reduzierung der Systemkomplexität. Das Pferd (die Automation) bezieht sein Umfeld in sein Handeln ein, informiert/warnt den Reiter (Fahrer) und handelt gegebenenfalls eigenständig. In Anlehnung an diese Metapher existieren bei H-Mode zwei Automationsgrade: „Tight rein“ (niedriger Automationsgrad, der Reiter hält die Zügel fester) und „loose

⁵⁹ Neuendorf et al. (2006): Pilot-in-the-loop - Auf dem Weg zum "artificial co-pilot" im Automobil

rein“ (hoher Automationsgrad, der Reiter hält die Zügel locker). Bei H-Mode ist der Fahrer in jedem der beiden Automationsmodi permanent über eine aktive Schnittstelle mit der Automation verbunden.

Den ersten Schritt zu einer weiteren Konzeptkonkretisierung bildet die Ermittlung der Erwartungen und der prinzipiellen Akzeptanz potentieller Nutzer sowie die Identifikation des grundlegenden Funktionsumfangs der Automation⁶⁰. Ein Schwerpunkt der Forschungsarbeiten zu H-Mode liegt auf der Ausgestaltung der Benutzerschnittstelle. So untersuchen Kienle et al.⁶¹ die Bedienung über einen aktiven Stick und Heesen et al.⁶² die Funktionserweiterung herkömmlicher Bedienelemente. Ein weiterer Fokus der Forschungsarbeiten liegt auf der Übergabe der Fahrzeugführungsaufgabe von der Automation an den Fahrer. Weißgerber et al.⁶³ untersuchen das Potential kontaktanaloger Head-up-Displays zur Anzeige des Systemzustands und der Systemabsicht. Heesen und Baumann⁶⁴ entwickeln ein Konzept zur Rückmeldung von Automations(un)sicherheit zur Verbesserung der Kontrollierbarkeit durch den Fahrer. Damböck et al.⁶⁵ ermitteln den Zeitbedarf für die Übernahme der Fahrzeugführung durch den Fahrer in repräsentativen Szenarien.

Entsprechend der beschriebenen Metapher wird die Automation bei H-Mode als intelligenter Interaktionspartner des Fahrers betrachtet. Ergänzend zu den beschriebenen Arbeiten untersuchen Kelsch et al.⁶⁶ eine als „Arbitrierung“ bezeichnete Mediation zwischen Fahrer und Automation als Lösungsansatz für mögliche Konflikte im Mensch-Maschine-System. Löper et al.⁶⁷ überführen das H-Mode-Konzept auf einen manöverbasierten Ansatz. Dabei erfolgt eine Manöverempfehlung durch die Automation, die auf der Bestimmung einer als „Valential“ bezeichneten Kenngröße für die Wertigkeit einer

⁶⁰ Flemisch et al. (2005): Vom Fahrer zum Reiter? Zwischenbericht 2005 auf dem Weg von der H-Metapher zum H-Mode für Bodenfahrzeuge

⁶¹ Kienle et al. (2009): Towards an H-Mode for highly automated vehicles: driving with side sticks

⁶² Heesen et al. (2010): Haptisch-multimodale Interaktion für hochautomatisierte, kooperative Fahrzeugführung bei Fahrstreifenwechsel-, Brems- und Ausweichmanövern, S. 7

⁶³ Weißgerber et al. (2012): Auswirkung einer kontaktanalogen Anzeige auf die Querführung hochautomatisierter Fahrzeuge

⁶⁴ Heesen et al. (2012): Rückmeldung von Automations(un)sicherheit als Möglichkeit zur Verbesserung der Kontrollierbarkeit von Automationsfehlern bei hoch- beziehungsweise teilautomatisiertem Fahren

⁶⁵ Damböck et al. (2012): Übernahmezeiten beim hochautomatisierten Fahren

⁶⁶ Kelsch et al. (2006): Links oder rechts, schneller oder langsamer? Grundlegende Fragestellungen beim Cognitive Systems Engineering von hochautomatisierter Fahrzeugführung, S. 4

⁶⁷ Löper et al. (2008): Kooperative, manöverbasierte Automation und Arbitrierung als Bausteine für hochautomatisiertes Fahren, S. 9 ff.

Handlung basiert. In diesem Kontext untersuchen Heesen et al.⁶⁸ eine Anpassung des Verhaltens der Automation in Abhängigkeit der Dringlichkeit einer Entscheidungsfindung („Handlungsspannung“).

1.3.2 Conduct-by-Wire

Abbildung 1-3 zeigt die Übertragung des CbW-Konzepts auf das zu Beginn dieses Kapitels eingeführte Drei-Ebenen-Modell der Fahrzeugführung nach Donges. Im Vergleich zu der in Abbildung 1-1 dargestellten konventionellen Fahrzeugführung wird die Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug durch die ereignisbasierte Kommunikation über Manöverbefehle von der Stabilisierungs- auf die Bahnführungsebene angehoben.

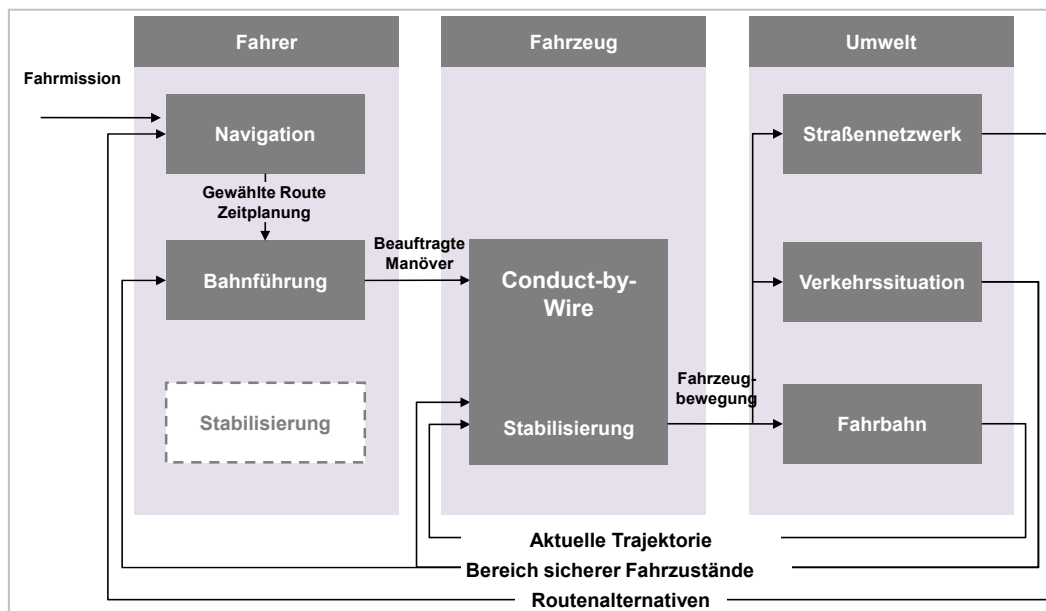


Abbildung 1-3: Manöverbasierte Fahrzeugführung nach dem CbW-Prinzip⁶⁹

Basierend auf dem vom Fahrer beauftragten Manöver erfolgen durch die Automation fahrzeugseitig die Trajektorienberechnung sowie deren Umsetzung auf der Stabilisierungsebene. Hierdurch entfällt für den Fahrer in der Regel der Eingriff auf der Stabilisierungsebene. Der Funktionsumfang der Manöverschnittstelle kann jedoch, initiiert durch die Automation, beispielsweise in wenig strukturierten Umgebungen, oder durch den Fahrer, beispielsweise zur Trajektorienparametrierung, degradiert werden. Der Fahrer erhält zudem über die Manöverschnittstelle Informationen bezüglich der situationsabhängigen Ausführbarkeit von Manövern.

⁶⁸ Heesen et al. (2010): Haptisch-multimodale Interaktion für hochautomatisierte, kooperative Fahrzeugführung bei Fahrstreifenwechsel-, Brems- und Ausweichmanövern, S. 5

⁶⁹ Nach Winner et al. (2005): X-by-Wire Betätigungselemente - Überblick und Ausblick

Das CbW-Konzept basiert somit auf einer eindeutigen Aufgaben- und Verantwortungsverteilung zwischen den beiden handelnden Interaktionspartnern Fahrer (Manöverbeauftragung) und Automation (Manöverausführung). Der Fahrer hat über die Manöverschnittstelle jederzeit die Möglichkeit die Fahraufgabe zu ändern beziehungsweise deren Ausführung zu spezifizieren. Der zuvor beschriebene Ansatz zur Optimierung von Fahrerassistenzsystemen durch Detektion der Fahrerabsicht wird hierdurch hinfällig. Ebenso ist, im Gegensatz zu dem H-Mode-Konzept, eine als „Arbitrierung“ bezeichnete Mediation zwischen Fahrer und Automation nicht erforderlich.

Die bisherigen Forschungsarbeiten zu CbW konzentrieren sich jeweils auf einen der beiden Interaktionspartner, den menschlichen Fahrer oder die Automation. Das Ziel besteht in der Untersuchung der Realisierbarkeit des CbW-Konzepts als Grundlage für eine prototypische Umsetzung in einem Versuchsfahrzeug. So wird die Interaktion zwischen Fahrer und Automation zunächst rein aus ergonomischen Gesichtspunkten untersucht. Der Fokus liegt hierbei auf dem Fahrer, der Analyse seiner Fähigkeiten und Fertigkeiten die manöverbasierte Fahrzeugführung anzuwenden, das Systemverhalten zu verstehen und vorherzusagen sowie im Falle des Erreichens von Systemgrenzen rechtzeitig eingreifen zu können. Schreiber⁷⁰ entwickelt ein auf Wickens und Hollands⁷¹ basierendes Fahrermodell der manöverbasierten Fahrzeugführung und identifiziert den für den knotenpunktfreien Diskursbereich auf Autobahnen und Landstraße aus Fahrersicht erforderlichen Manöverumfang. Kauer et al. untersuchen Nutzungsszenarien der manöverbasierten Fahrzeugführung⁷² und zeigen die Akzeptanz potentieller Nutzer von Conduct-by-Wire⁷³. Ein weiterer Schwerpunkt der Forschungsarbeiten liegt auf der Ausgestaltung der Manöverschnittstelle. Franz et al. untersuchen hierbei die Eignung verschiedener, innovativer Bedien⁷⁴- und Anzeigeconzepte⁷⁵.

Als erster Schritt zu einer technischen Umsetzung von CbW und ergänzend zu den auf den menschlichen Fahrer fokussierten Arbeiten von Schreiber konkretisieren Hakuli et

⁷⁰ Schreiber (2012): Konzeptionierung und Evaluierung eines Ansatzes zu einer manöverbasierten Fahrzeugführung im Nutzungskontext Autobahnfahrten

⁷¹ Wickens et al. (1999): Engineering Psychology and Human Performance

⁷² Kauer et al. (2011): Nutzungsszenarien der manöverbasierten Fahrzeugführung

⁷³ Kauer et al. (2010): Akzeptanz manöverbasierter Fahrzeugführungskonzepte am Beispiel von Conduct-by-Wire und Kauer et al. (2012): User acceptance of cooperative maneuver-based driving – a summary of three studies

⁷⁴ Franz et al. (2012): Comparison of two human-machine-interfaces for cooperative maneuver-based driving und Franz et al. (2012): pieDrive – a New Driver-Vehicle Interaction Concept for Maneuver-Based Driving

⁷⁵ Franz et al. (2011): Konzeption eines kontaktanalogen Head-up-Displays für Fahrerassistenzsysteme am Beispiel Conduct-by-Wire

al. die fahrzeugseitige Umsetzung der vom Fahrer beauftragten Manöver. Abbildung 1-4 zeigt den im Vergleich zu Abbildung 1-3 weiter detaillierten Ausschnitt der elementaren Systemarchitektur auf der Bahnführungsebene, wobei diese in die Manöver- und die Trajektorienebene unterteilt wird. Die vom Fahrer über die Manöverschnittstelle kommunizierten Manöverbefehle werden an die Manöversteuerung weitergeleitet. Die Aufgabe der Manöversteuerung besteht in Abhängigkeit der aktuellen Fahrsituation in der Zuweisung, Koordinierung und Parametrierung des Manöverbefehls zu einem Paar aus einer longitudinalen und einer lateralen Fahrfunktion⁷⁶. Diese Fahrfunktionen berechnen die Trajektorien und kontrollieren die für die Ausführung erforderliche Aktorik. Durch einen systematischen Falsifikationsansatz identifizieren Hakuli et al. einen elementaren und in der Simulationsumgebung IPG CarMaker validierten Fahrfunktionskatalog⁷⁷. Der Betrachtungsfokus dieser Untersuchungen liegt ausschließlich auf dem außerstädtischen, knotenpunktfreien⁷⁸ Diskursbereich. Hierzu zählt beispielsweise der manöverbasierte Fahrstreifenwechsel auf einer Autobahn.

⁷⁶ Hakuli et al. (2010): Development and Validation of Manoeuvre-Based Driver Assistance Functions for Conduct-by-Wire with IPG CarMaker

⁷⁷ Hakuli et al. (2011): Integriertes Konzept für die manöverbasierte Fahrerassistenz

⁷⁸ In den Richtlinien für die Anlage von Straßen wird zwischen plangleichen (Abwicklung des Verkehrs auf einer Ebene) und planfreien (Verteilung des Verkehrs auf mehrere Ebenen, beispielsweise Autobahnkreuz) Knotenpunkten unterschieden (vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (1988): Richtlinie für die Anlage von Straßen (RAS)). Im Folgenden wird bei der Verwendung des Begriffs Knotenpunkt, ein plangleicher Knotenpunkt angenommen.

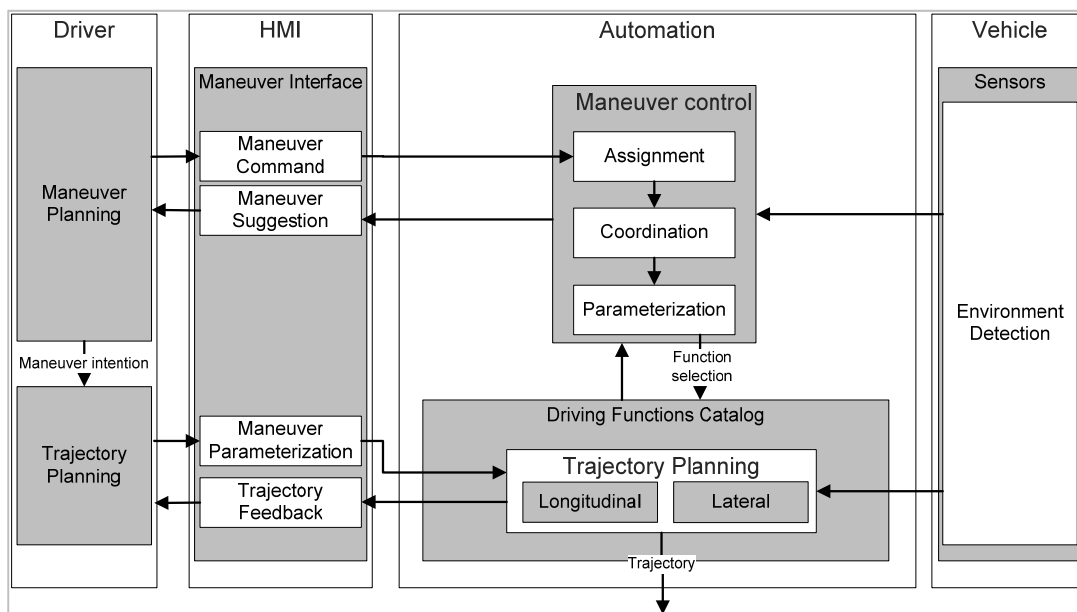


Abbildung 1-4: Elementare Systemarchitektur auf der Bahnführungsebene (basierend auf Hakuli et al.⁷⁹)

1.3.3 Forschungsziele und -methodik

Die Untersuchungen im Bereich der Ergonomie und der fahrzeugseitigen Funktionsentwicklung beschränken sich bislang auf das grundlegende Interaktionskonzept von CbW in Form der Manöverbeauftragung durch den Fahrer und der Manöverausführung durch die beschriebene Manöversteuerung und den Fahrfunktionskatalog.

Neben der reinen Manöverentscheidung entsteht in Szenarien mit erhöhtem Kollisionsrisiko, in denen die Trajektorie anderer Verkehrsteilnehmer gekreuzt wird, zusätzlicher Entscheidungsbedarf bezüglich der sicheren Ausführbarkeit des Manövers. In den bisherigen Untersuchungen wird stets davon ausgegangen, dass diese Aufgabe allein von der Automation übernommen wird, wobei keine Betrachtung potentieller technischer Grenzen erfolgt. Ebenso wird die Realisierbarkeit einer kooperativen Interaktion zwischen Fahrer und Automation zur Entscheidungsfindung während der Manöverausführung bislang nicht untersucht. Die zuvor beschriebenen Ansätze der Arbitrierung und der auf dem Valential basierenden Manöverempfehlung im Rahmen von H-Mode beziehen sich auf die Interaktion bis zur Manöverentscheidung, nicht aber auf die Phase der Manöverausführung.

⁷⁹ Hakuli et al. (2010): Development and Validation of Manoeuvre-Based Driver Assistance Functions for Conduct-by-Wire with IPG CarMaker

Nach der Betrachtung des Standes der Forschung und Technik stellt sich somit die Frage:

Ist eine kooperative Interaktion zwischen Fahrer und Automation zur Entscheidungsfindung hinsichtlich der Ausführbarkeit von Manövern im Kontext der teilautomatisierten, manöverbasierten Fahrzeugführung darstellbar?

Dem Verfasser dieser Arbeit ist nicht bekannt, dass diese Fragestellung bereits in anderen Forschungsvorhaben wissenschaftlich diskutiert wird.

Das Hauptziel dieser Arbeit besteht in der Klärung der Fragestellung, wie eine kooperative Interaktion zur Entscheidungsfindung hinsichtlich der Ausführbarkeit von Manövern, die die Anforderungen des Fahrers und der Automation gleichermaßen einbezieht, unter Berücksichtigung der technischen Realisierbarkeit gestaltet sein kann.

Aus dieser zentralen Fragestellung leiten sich das methodische Vorgehen, das auf einem Top-down-Ansatz basiert, sowie die Untersuchungsgegenstände dieser Arbeit ab. Den Ausgangspunkt bilden grundlegende Betrachtungen des Interaktionskonzepts auf der Systemebene. Hierzu zählen die Ermittlung der zu erfüllenden Anforderungen, wie die Identifikation repräsentativer Szenarien, einzuhaltende verhaltensrechtliche Vorschriften sowie Anforderungen des Fahrers an eine kooperative Interaktion. Die darauf basierende systematische Entwicklung eines Interaktionskonzepts erfolgt zunächst primär aus Sicht der Automation. Entgegen bisherigen Untersuchungen, in denen die von der Automation zu erfüllenden Anforderungen aus Sicht des Fahrers definiert werden, bilden in dieser Arbeit die aus technischer Sicht darstellbaren Möglichkeiten zur Unterstützung des Fahrers bei der Entscheidungsfindung die Entwicklungsgrundlage. Durch dieses Vorgehen lässt sich der kooperative Beitrag zu der Entscheidungsfindung von Fahrer und Automation in unterschiedlichen Systemausprägungen ableiten.

Der zweite Teil dieser Arbeit befasst sich auf der Funktionsebene mit der praktischen Umsetzung des zuvor entwickelten Interaktionskonzepts. Hierzu zählt die Entwicklung des Funktionsumfangs der Automation durch Integration in die bisherige Systemarchitektur und die Untersuchung der regelungstechnischen Gestaltung. Zudem werden die sich für die unterschiedlichen Systemausprägungen ergebenden Anforderungen an die maschinelle Umfeldwahrnehmung systematisch identifiziert und deren Realisierbarkeit durch einen Abgleich mit dem heutigen Stand der Forschung und Technik bewertet. Abschließend erfolgt die Integration des entwickelten Konzepts in einen statischen Fahrsimulator zur Untersuchung der Gebrauchstauglichkeit im Rahmen einer Probandenstudie. Neben der softwaretechnischen Umsetzung geht diesem Schritt eine prototypische Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle in Form eines Anzeige- und Bedienkonzepts voraus.

Die Ergebnisse dieser Arbeit liefern somit einen Beitrag zur Untersuchung der technischen Realisierbarkeit einer teilautomatisierten, kooperativen Fahrzeugführung nach

dem Conduct-by-Wire-Konzept. Zudem bilden sie die Grundlage für die Übertragung des CbW-Konzepts auf Knotenpunktszenarien und somit auch auf, im Vergleich zu bisherigen Untersuchungen komplexere, innerstädtische Szenarien.

Die methodische Vorgehensweise, an der sich auch die Gliederung dieser Arbeit orientiert, ist in Abbildung 1-5 dargestellt.

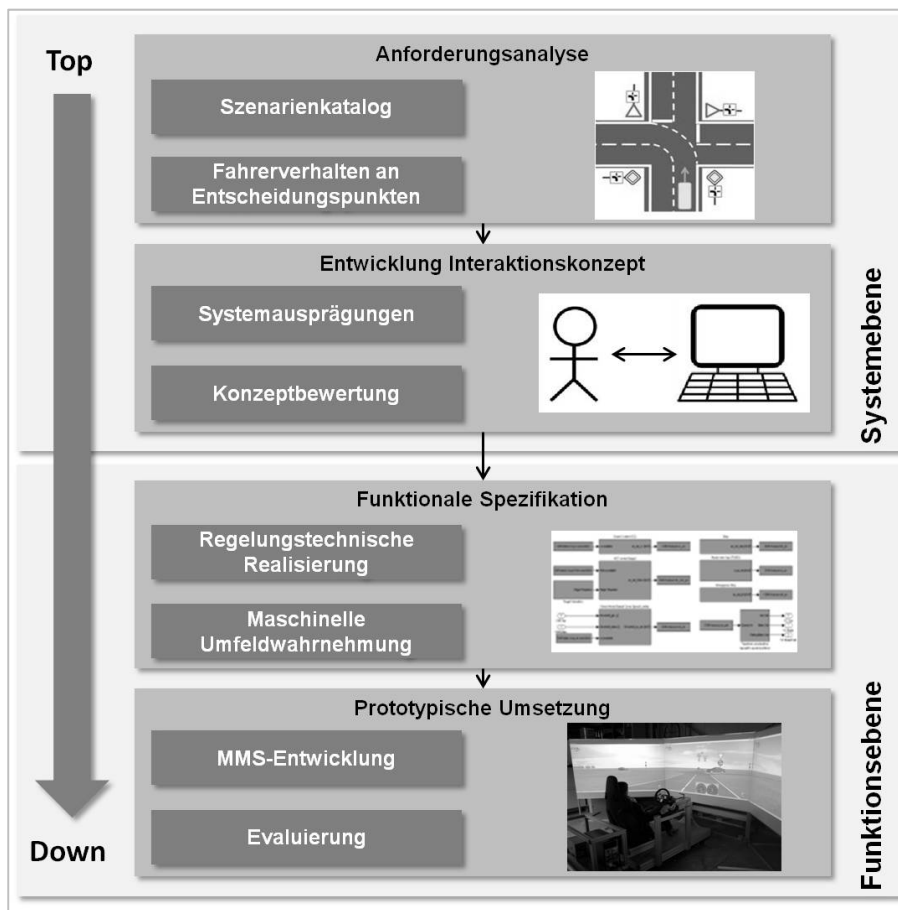


Abbildung 1-5: Methodik der Arbeit

Die Konkretisierungen der beschriebenen Untersuchungsgegenstände und die Formulierung von wissenschaftlich prüfbar (falsifizierbar) Nullhypothesen nach Popper⁸⁰ wie auch deren Untersuchung erfolgt in den jeweiligen Kapiteln dieser Arbeit.

⁸⁰ Popper (2005): Logik der Forschung

2 Anforderungsanalyse

Die Entwicklung des in dieser Arbeit vorgestellten Interaktionskonzepts basiert auf einer Analyse der vom System zu erfüllenden Anforderungen. Die Grundlage hierzu bildet die Identifikation der von Conduct-by-Wire zu bewältigenden Szenarien, bei denen eine Entscheidung über die Fortführung der Manöverausführung erforderlich ist. Zudem wird das Fahrerverhalten bei der Bewältigung von Entscheidungspunkten bei der konventionellen Fahrzeugführung untersucht und dessen Übertragbarkeit auf die teilautomatisierte Fahrzeugführung bewertet.

2.1 Szenarienidentifikation

2.1.1 Stand der Forschung und Technik

Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich der Fahrzeugautomatisierung haben in den vergangenen Jahrzehnten eine Vielzahl von Entwicklungswerkzeugen – und –Methoden hervorgebracht. Die von den entwickelten Systemen zu erfüllenden Anforderungen und somit die Entwicklungsrichtlinien werden meist in verschiedenen Arten von Katalogen (beispielsweise Use-Case-Kataloge, Situationskataloge, Szenarienkataloge, etc.) dokumentiert, die durch unterschiedliche Herangehensweisen erstellt werden.

Der erste Ansatz verfolgt die Identifizierung von Verkehrssituationen beschreibenden Parametern und deren anschließende systematische Kombination zur Erzeugung eines Verkehrssituationskatalogs. Der von Benda⁸¹ entwickelte Ansatz basiert auf der Beschreibung von Fotografien durch Versuchspersonen, aus denen anschließend die die Verkehrssituationen beschreibenden Merkmale abgeleitet werden. Das Ergebnis dieses Vorgehens ist ein Situationskatalog mit 14 Kategorien wie beispielsweise „Autobahn“, „Knotenpunkte“, oder „Engstelle“. Jede dieser Kategorien kann dabei bis zu zehn unterschiedliche Ausprägungen aufweisen. Der beschriebene Katalog bietet durch systematische Kombination und Variation aller Merkmale den Vorteil, prinzipiell alle möglichen Ausprägungen an Verkehrssituationen abzudecken. Dieses Vorgehen führt jedoch zu wesentlichen Nachteilen. Durch die systematische Kombination aller Merkmale, die im ersten Schritt automatisiert erfolgen kann, ergeben sich ca. 2 Millionen mögliche Ver-

⁸¹ Benda (1977): Klassifikation von Verkehrssituationen aus Fahrersicht.

kehrssituationen. Hierunter befinden sich auch nicht sinnvolle Kombinationen, die im Anschluss „manuell“ aussortiert werden müssen. Zudem erfolgt die Situationsbeschreibung prinzipbedingt aus der Perspektive des Ego-Fahrzeugs. Die die anderen Verkehrsteilnehmer betreffenden Situationsparameter, wie bspw. die Fahrtrichtungsbeschränkung bei der Zufahrt auf eine Kreuzung, werden demnach nicht berücksichtigt.

Der von Benda entwickelte Katalog wurde im Folgenden für unterschiedliche Anwendungen weiterentwickelt und dessen Umfang reduziert. So identifiziert Galsterer⁸² zur Untersuchung der Fahrerbeanspruchung einen realen Versuchsparcours im Großraum München, der möglichst viele der von Benda ermittelten Situationen enthält. Fastenmeier⁸³ reduziert den Katalog von Benda auf acht Kategorien mit jeweils bis zu sieben Ausprägungen und bestimmt die Häufigkeit des Auftretens der durch eine systematische Parametervariation gewonnenen Situationen. Hieraus ergibt sich ein Situationskatalog mit jeweils 100 Situationen für jeden der vier Fahrtypen „Fahrt von/zur Arbeit“, „Erledigungsfahrt“, „Freizeitfahrt“ und „Wochenendfahrt“ zur Untersuchung des Fahrerverhaltens. Zur Untersuchung der situativen Anforderungsanalyse von Fahraufgaben erweitern Fastenmeier et al.⁸⁴ diesen Katalog jedoch wieder durch im Rahmen von Feldstudien empirisch identifizierte Fahrsituationen sowie Merkmalsausprägungen. Domsch et al.⁸⁵ präsentieren einen Katalog von Referenzfahrsituationen für die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen, der auf einem nicht näher definierten Merkmalskatalog basiert.

Ein weiterer typischer Ansatz, der als erster Schritt bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen verfolgt wird, ist die Identifikation potentiellen Assistenzbedarfs basierend auf einer Unfalldatenanalyse⁸⁶. Das Ergebnis dieses Vorgehens sind sogenannte Use-Case-Kataloge. Diese Use-Cases werden im weiteren Verlauf des Entwicklungsprozesses zu Test-Cases abstrahiert, die es ermöglichen, die entwickelte Funktionalität unter kontrollierbaren Bedingungen zu überprüfen. Vergleichbar ist das Vorgehen bei der Entwicklung des Funktionsumfangs vollautomatisierter Fahrzeuge, der meist auf einen spezifischen Anwendungsfall, beispielsweise das Fahren auf der Autobahn, oder Aufgaben, die im Rahmen von Wettbewerben wie beispielsweise der DARPA Urban

⁸² Galsterer (1979): Belastung und Beanspruchung von Kraftfahrern

⁸³ Fastenmeier (1995): Die Verkehrssituation als Analyseeinheit im Verkehrssystem

⁸⁴ Fastenmeier et al. (2007): Driving task analysis as a tool in traffic safety research and practice

⁸⁵ Domsch et al. (2008): Einsatz von Referenzfahrsituationen bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen

⁸⁶ Beispiele sind Vollrath et al. (2006): Ableitung von Anforderungen an Fahrerassistenzsysteme aus Sicht der Verkehrssicherheit; Reichart (2001): Menschliche Zuverlässigkeit beim Führen von Kraftfahrzeugen oder Kühn et al. (2009): Benefit Estimation of Advanced Driver Assistance Systems for Cars Derived from Real-Life Accidents

Challenge⁸⁷ zu bewältigen sind, beschränkt ist. Der Fokus konzentriert sich hierbei prinzipbedingt auf die Perspektive der Automation.

Die beschriebenen Ansätze sind auf den in dieser Arbeit verfolgten methodischen Ansatz nicht direkt anwendbar. Einerseits sind die entwickelten Kataloge zu umfangreich und enthalten, durch die automatisierte Kombination von Merkmalen, nicht sinnvolle Parameterkombinationen. Andererseits wird in dieser Arbeit ein ganzheitlicher Ansatz verfolgt, bei dem untersucht wird, ob die konventionelle Fahrzeugführung durch das CbW-Konzept ersetzt werden kann. Demnach sind alle potentiellen Szenarien zu betrachten, die ein CbW-Fahrzeug bewältigen muss. Die beschriebenen Reduktionsmaßnahmen, die meist auf einer Repräsentativitätsuntersuchung oder der Beschränkung auf einige wenige konkrete Anwendungsfälle basieren, sind nicht zulässig, da unter Umständen relevante Ausprägungen oder Kombinationen vernachlässigt werden. Hinzu kommt, dass die genannten Kataloge nicht alle beschreibenden Merkmale enthalten. So fehlen beispielsweise Merkmale wie Radwege oder abknickende Vorfahrtsstraßen.

2.1.2 Entwicklung eines CbW-Szenarienkatalogs

Zusätzlich zu der Vielzahl unterschiedlicher Kataloge kommt hinzu, dass innerhalb der Forschungsgemeinschaft keine konsistente Terminologie angewandt wird. Je nach Forscher oder Untersuchungsfokus werden Begriffe wie „Situation“ oder „Szenario“ mit unterschiedlichen Bedeutungen verwendet. Im Folgenden wird daher die von Geyer et al.⁸⁸ eingeführte Ontologie für die assistierte und automatisierte Fahrzeugführung verwendet:

Szenerie: Strukturierte Sammlung einzelner statischer Elemente, die den Rahmen der Szene bilden. Zu den Szenerieelementen zählen beispielsweise Straßentypen und -geometrien, Verkehrszeichen oder Fußgängerüberwege.

Szene: Die Szene ist durch die Szenerie, dynamische Elemente und optionale Fahrweisungen definiert. Dynamische Elemente (beispielsweise Lichtsignalanlagen oder Fußgänger) verfügen über einen vordefinierten Ausgangszustand. Innerhalb einer Szene ändern diese dynamischen Elemente ihren Zustand.

Situation: Eine Situation beschreibt den aktuellen Zustand, der durch eine Kombination aus Situationsbezeichnung, einem Satz von die Situation beschreibenden Bedingungen, die in der jeweiligen Situation wahr sein müssen und einem der Situation zugewiesenen Handlungsschema definiert ist.

⁸⁷ Buehler et al. (2009): The DARPA Urban Challenge Autonomous Vehicles in City Traffic

⁸⁸ Geyer et al. (2013): Concept and Development of a Unified Ontology for Generating Test and Use Case Catalogues for Assisted and Automated Vehicle Guidance

Szenario: Das Szenario umfasst die fortlaufende Handlung eines der beiden Akteure, menschlicher Fahrer oder Automation. Ein Szenario entspricht dabei einer Verkettung von Situationen.

Wie bereits beschrieben, bildet der CbW-Szenarienkatalog die Grundlage für die Entwicklung des Interaktionskonzepts sowie die Ableitung von technischen Anforderungen. Bei der Entwicklung dieses Katalogs wird ein systematischer Top-down-Ansatz verfolgt, der gewährleistet, dass möglichst viele potentielle Szenarien mit Entscheidungsbedarf bei der Manöverausführung abgedeckt werden.

Den Ausgangspunkt des in Abbildung 2-1 dargestellten Vorgehens bildet die systematische Identifikation von Szenarien beschreibenden Merkmalen. Diese werden aus den technischen Regelwerken für das Straßenwesen in Deutschland⁸⁹ und der Straßenverkehrsordnung (StVO)⁹⁰ abgeleitet. Erstere enthalten Vorschriften zur geometrischen Gestaltung und Verkehrsführung. Die Straßenverkehrsordnung liefert Merkmale wie Fahrbahnmarkierungen oder Typ und Platzierung von Verkehrszeichen sowie Verhaltensvorschriften. Aus diesen Regelwerken lassen sich zudem Implikationen von Gestaltungselementen⁹¹ sowie zulässige Kombinationen von Merkmalsausprägungen⁹² und Szenarien⁹³ ableiten, wodurch die Zahl möglicher Variationen automatisch begrenzt wird.

⁸⁹ Die für diesen Untersuchungsfokus relevanten Richtlinien sind: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (1988): Richtlinie für die Anlage von Straßen (RAS); Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2006): Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen RAS 06 und Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2010): Richtlinien für Lichtsignalanlagen RiLSA

⁹⁰ Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2010): Straßenverkehrs-Ordnung

⁹¹ Beispiel: Eine getrennte Signalisierung des Abbiegeverkehrs setzt besondere Fahrstreifen mit Richtungsmarkierung voraus. (vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2010): Richtlinien für Lichtsignalanlagen RiLSA, Abschnitt 2.3.1.1 Grundsätzliche Überlegungen, S. 13)

⁹² Beispiel: Eine Anlage von Rechtsabbiegefahrbahnen (Bypässe) an Kreisverkehren ist nur bei „großen Kreisverkehren“ (Außendurchmesser von 40 m bis 60 m) zulässig. (vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2006): Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen RAS 06, Abschnitt 6.3.5 Kreisverkehre, S.115)

⁹³ Beispiel: Die Kombination einer Kreuzung mit einem Fahrstreifenende ist nicht zulässig. Für die Zusammenführung zweier Fahrstreifen oder den Übergang in einen Richtungsfahrstreifen ist ein definierter Mindestabstand zur Kreuzung einzuhalten vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2010): Richtlinien für Lichtsignalanlagen RiLSA, Abschnitt 3.2.1 Durchgehende Fahrstreifen, S. 30).

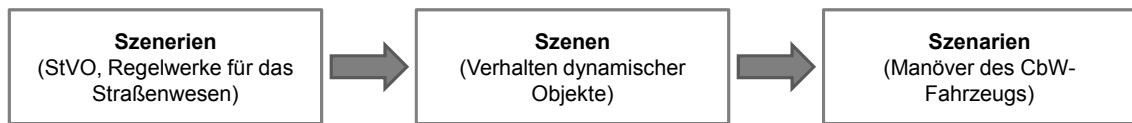


Abbildung 2-1: Methodik zur Erstellung des CbW-Szenarienkatalogs

Die identifizierten Szenerien und deren beschreibende Parameter lassen sich einer der vier in Tabelle 2-1 aufgeführten Klassen „Kreuzung“, „Kreisverkehr“, „Querverkehr“ und „Längsverkehr“ zuordnen. Die Auswahl der Merkmale orientiert sich an den für die Untersuchungspunkte dieser Arbeit relevanten Einflussfaktoren. So werden in dieser frühen Konzeptphase ideale Umweltbedingungen angenommen, so dass die die Szenerie beeinflussenden Faktoren wie Lichtverhältnisse oder der Fahrbahnzustand nicht berücksichtigt werden.

Die auf diese Weise identifizierten Szenerieklassen treten im realen Straßenverkehr nur selten getrennt voneinander auf. Beispielsweise stellt die Kombination einer Kreuzung mit Fußgängerüberwegen eine häufig auftretende Szenerie dar. Hinsichtlich einer möglichst vollständigen Abdeckung aller in der Realität auftretenden Szenerien kann in zwei Schritten vorgegangen werden. Zunächst werden alle Szenerien systematisch miteinander kombiniert und im zweiten Schritt nicht sinnvolle Kombination gestrichen beziehungsweise die Zulässigkeit dieser Kombination anhand der Regelwerke für das Straßenwesen in Deutschland und der Straßenverkehrsordnung (StVO) überprüft.⁹⁴

Der entwickelte Szeneriekatalog wurde anhand von Videodaten von im Rhein-Main-Gebiet durchgeführten Messfahrten⁹⁵ validiert. Hierbei konnte keine Szenerie identifiziert werden, die anhand der Merkmale des entwickelten Katalogs nicht oder unvollständig hätte definiert werden können. Durch gezielte Auswahl der für den jeweiligen Untersuchungsfokus relevanten Szenerieparameter kann der Umfang des Katalogs reduziert werden.

⁹⁴ Anhang A ist eine Übersicht über die möglichen Kombinationen zu entnehmen

⁹⁵ Die zufällig ausgewählte Strecke hat eine Gesamtlänge von 400 km. Der Anteil der Straßentypen ergibt sich zu 63% Landstraße und 37 % Stadtstraße.

Tabelle 2-1: CbW-Szenarienkatalog⁹⁶

Klasse	Szenerie	Merkmale
Kreuzung	X-Kreuzung T-Kreuzung Sternkreuzung ⁹⁷	Vorfahrtsregelung Zufahrtsrichtung Anzahl der Kreuzungszufahrten Anzahl der Kreuzungsausfahrten Anzahl der Fahrstreifen Schnittwinkel der Fahrbahnen
	Verkehrinsel	Vorfahrtsregelung
	Wendefahrbahn	Vorfahrtsregelung
Kreisverkehr	Kreisverkehr	Vorfahrtsregelung Anzahl der Fahrstreifen Kreisfahrbahn Anzahl der Fahrstreifen Zufahrten Schnittwinkel der Fahrbahnen
	Bypass	Vorfahrtsregelung
Querverkehr	Fußgängerüberweg Fahrradweg Bahnübergang	Vorfahrtsregelung
Längsverkehr	Fahrstreifenende	Einseitig/beidseitig Rechts/links
	Hindernis ausweichen	Rechts/links Mit/ohne Fahrstreifenwechsel Paralleler/entgegenkommender Fahrstreifen
	Sonderfahrstreifen	Rechts/links
	Lichtsignalanlage	

Aufbauend auf dem Szenarienkatalog lassen sich Szenen durch Kombination mit dynamischen Objekten und Definition deren Verhaltens generieren. Die entwickelten Szenen lassen sich wiederum mit dem vom CbW-Fahrzeug ausgeführten Manövern zu Szenarien verknüpfen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird an verschiedenen Stellen auf den CbW-Szenarienkatalog zurückgegriffen. Der hierbei zu Grunde gelegte Szenarienkatalog, der sich aus den getroffenen Annahmen und der damit verbundenen Parameterauswahl ergibt, ist den entsprechenden Abschnitten zu entnehmen.

⁹⁶ Die Tabelle zeigt den auf den Fokus dieser Arbeit reduzierten Katalog. Eine Auflistung aller Merkmale und Merkmalsausprägungen ist Anhang A zu entnehmen.

⁹⁷ Kreuzung mit mehr als vier verbundenen Straßenzügen

2.2 Fahrerverhalten an Entscheidungspunkten

Das Ziel des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Interaktionskonzepts besteht darin, den Fahrer in kooperativer Weise in den Entscheidungsprozess zu integrieren. Gegenstand dieses Abschnitts ist daher die Betrachtung des Fahrerverhaltens an den Entscheidungspunkten, die in den Szenarien des im vorherigen Abschnitt beschriebenen Katalogs auftreten. Dieser Abschnitt unterteilt sich in die gemäß der StVO einzuhaltenden Verhaltensvorschriften, eine Analyse des menschlichen Entscheidungsprozesses sowie Untersuchungen zum Fahrerverhalten an Entscheidungspunkten.

2.2.1 Verhaltensvorschriften gemäß Straßenverkehrsordnung

Die StVO liefert die von Fahrzeugführern zu befolgenden Verhaltensvorschriften. Übertragen auf das in dieser Arbeit zu entwickelnde Interaktionskonzept sind jene Abschnitte von Interesse, in denen das Annäherungsverhalten an Entscheidungspunkte definiert wird. Des Weiteren geben die Abschnitte, in denen der an den Entscheidungspunkten zu deckende Informationsbedarf beschrieben wird, Aufschluss über die während der Manöverausführung zu beachtenden Entscheidungspunkte, deren Position sowie die zu erfüllenden Anforderungen an die maschinelle Umfeldwahrnehmung. Die für diese Arbeit relevanten Auszüge aus der StVO sind in Anhang B aufgeführt.

2.2.2 Der menschliche Entscheidungsprozess

Phänomenologisch-empirische Modelle menschlicher Informationsverarbeitung basieren häufig auf dem sequentiellen Modell nach Luczak⁹⁸. Diesem Modell liegt die Annahme und empirische Beobachtung zu Grunde, dass Informationsverarbeitung eine gewisse, häufig als Reiz-Reaktions-Zeit gemessene Zeit beansprucht. Luczak unterteilt die Verarbeitungsstufen eines auf den Menschen wirkenden Signals und der abgeleiteten Reaktion in „Entdecken/Wahrnehmen“, „Erkennen/Identifizieren“, „Entscheiden“ und „Handeln/Aktion“.

Kapazitätsmodelle, wie das nach Wickens und Hollands⁹⁹, erweitern diese sequentielle Informationsverarbeitung um eine momentan begrenzte, zeitlich variable, unspezifische

⁹⁸ Luczak (1975): Untersuchungen informatorischer Belastung und Beanspruchung des Menschen nach Schlick et al. (2010): Arbeitswissenschaft, S. 228

⁹⁹ Wickens et al. (1999): Engineering Psychology and Human Performance nach Schlick et al. (2010): Arbeitswissenschaft, S. 295

Ressource des Informationsverarbeitungssystems, die als Verarbeitungskapazität interpretiert wird (vgl. Abbildung 2-2). Wickens integriert zudem das Langzeit- und Arbeitsgedächtnis, die einen entscheidenden Beitrag zur Mustererkennung und Entscheidungsfindung liefern. Für den Fall, dass mehrere Prozesse simultan auf eine Kapazität zugreifen, erfolgt eine Aufteilung der Kapazität. Die Theorie der multiplen Ressourcen nach Wickens⁹⁹ geht zudem, statt von einer zentralen Ressource, von mehreren Kapazitäten mit ressourcenartigen Eigenschaften aus.

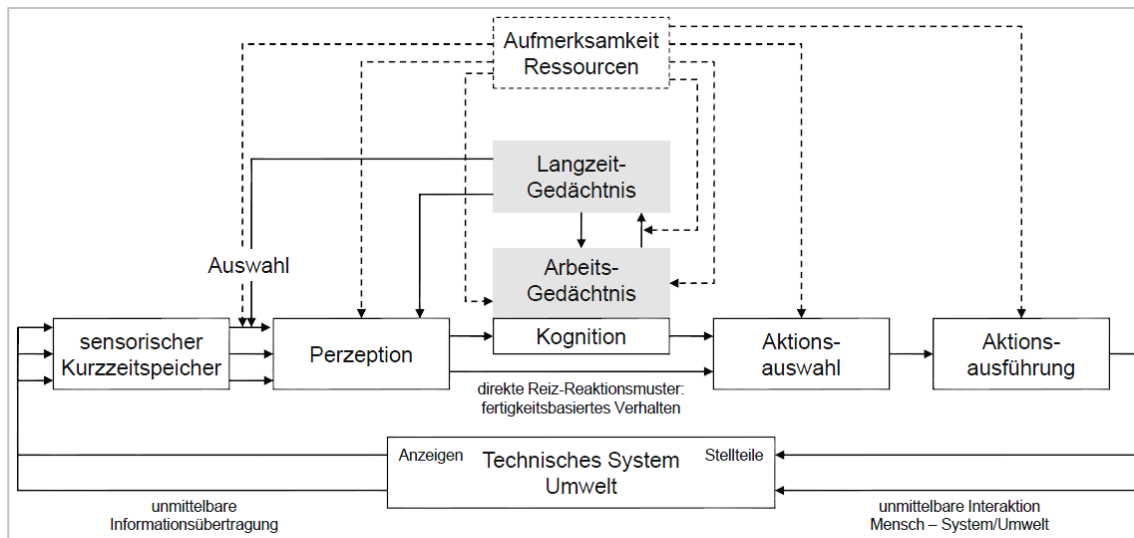


Abbildung 2-2: Informationsverarbeitungsmodell nach Wickens und Hollands¹⁰⁰

Die Entscheidungsgrundlage im Kontext der Fahrzeugführung bildet das von Endsley¹⁰¹ beschriebene und als Situation Awareness (SA) bezeichnete Bewusstsein des Fahrers über die Situation, in der er sich gerade befindet. Endsley unterscheidet, vergleichbar zu dem Modell nach Wickens und Hollands, drei aufeinander folgende Prozessschritte der SA-Bildung („Perception of elements in the environment“, „Comprehension of the current situation“ und „Projection of future states“). Einen weiteren Einfluss auf die Entscheidungsfindung hat gemäß der menschlichen Risiko-Homöostase-Theorie nach Wilde¹⁰² das individuelle Grenzkrisiko des Fahrers. Plavsic et al.¹⁰³ untersuchen Einflussfaktoren auf das subjektive Risikoempfinden von Fahrern in Kreuzungssituationen.

¹⁰⁰ Schlick et al. (2010): Arbeitswissenschaft, S. 295 nach Wickens et al. (1999): Engineering Psychology and Human Performance

¹⁰¹ Endsley (1995): Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems

¹⁰² Wilde (1982): The Theory of Risk Homeostasis: Implications for Safety and Health

¹⁰³ Plavsic et al. (2010): Situation Awareness Assessment in Critical Driving Situations at Intersections by Task and Human Error Analysis

Ergänzend zu den beschriebenen Modellvorstellungen existieren zahlreiche Studien zur Ermittlung der menschlichen Reiz-Reaktions-Zeit als Maß für die Dauer des menschlichen Informationsverarbeitungsprozesses. Die Reiz-Reaktions-Zeit beginnt mit dem Zeitpunkt, zu dem der Fahrer ein Objekt oder einen Zustand erstmalig wahrnimmt und endet mit der ersten erkennbaren Reaktion. Die in verschiedenen Studien ermittelte Reiz-Reaktions-Zeit variiert gemäß Olson und Farber¹⁰⁴ zwischen 0,5 s und 3,5 s und liegt in seltenen Fällen auch darüber. Green¹⁰⁵ nennt fünf Haupteinflussfaktoren auf die Reiz-Reaktionszeit. Dies sind die Erwartungshaltung („expectation“), die Dringlichkeit („urgency“), das Alter („age“), das Geschlecht („sex“) und die kognitive Beanspruchung („cognitive load“). Der bedeutendste dieser Einflussfaktoren ist gemäß Green¹⁰⁶ die Erwartungshaltung, die er in drei Kategorien einteilt. Demnach kann eine Situation für den Fahrer erwartet („expected“), unerwartet („unexpected“) oder überraschend („surprised“) sein. Je nach Kategorie variiert die Reiz-Reaktions-Zeit in den von Green durchgeführten Studien zwischen 0,7 s und 1,5 s. Zudem ist zu beobachten, dass Fahrer die zur Verfügung stehende Zeit für die Entscheidungsfindung ausnutzen, auch wenn diese länger als 1,5 s ist.

Diese Studien besitzen zunächst nur für die konventionelle Fahrzeugführung Gültigkeit und können demnach nicht ohne Weiteres auf das CbW-Konzept übertragen werden. Der Fokus dieser Studien liegt meist auf der Betrachtung von Einzelereignissen, wie beispielsweise der Reaktion auf ein plötzlich auftretendes Hindernis. Dies entspricht nicht der gesamten Informationsvielfalt, die während der Entscheidungsfindung bezüglich einer Passage von Entscheidungspunkten auftreten kann. Zudem kann angenommen werden, dass sich der Fahrer eines CbW-Fahrzeugs über die zu treffende Entscheidung während der Annäherung an einen Entscheidungspunkt bewusst ist. Diese Studien erlauben dennoch eine grobe Abschätzung des Zeitbedarfs eines menschlichen Fahrers für die Entscheidungsfindung.

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Entscheidungsprozess hinsichtlich der Ausführbarkeit von Manövern in unterschiedlichen Szenarien betrachtet. Dieser Prozess erfordert von dem menschlichen Fahrer und je nach Automationsgrad von der Automation die Verarbeitungsschritte der Perzeption (Wahrnehmung des Fahrzeugumfelds), der Kognition (Interpretation des Fahrzeugumfelds und Entscheidungsfindung) sowie der Ableitung und Ausführung einer Handlung (Kommunikation der Entscheidung über die Mensch-Maschine-Schnittstelle). Die für diese Prozessschritte erforderliche Zeit wird im Folgenden, gemäß der Aufgabe des Fahrers und der Automation, als Entscheidungsbeziehungweise Reaktionszeit bezeichnet.

¹⁰⁴ Olson et al. (2003): Forensic aspects of driver perception and response, S. 315

¹⁰⁵ Green (2000): How Long Does It Take to Stop?

¹⁰⁶ Green (2000): How Long Does It Take to Stop?, S. 203

2.2.3 Fahrerhaltensanalysen

Neben den zuvor beschriebenen Modellen und Untersuchungen zur Entscheidungsfindung des menschlichen Fahrers existieren zahlreiche Untersuchungen zur Analyse des Fahrerhaltens an Entscheidungspunkten. Van der Horst¹⁰⁷ führt videobasierte Untersuchungen zum Annäherungsverhalten von Fahrzeugführern an Kreuzungen und Bahnübergängen durch. Van der Horst identifiziert unabhängig vom Manöver einen Verzögerungsbeginn bei einer durchschnittlichen Time-to-Intersection (TTI)¹⁰⁸ von 3 s und eine erste Kopfbewegung als Indiz der Informationsaufnahme bei $TTI=2,3$ s. Nach Annahme einer Umsetzzeit von 0,6 s und einer Ansprechzeit der Bremse von 0,4 s lässt sich daraus der Zeitpunkt der Entscheidung bei einer TTI von 4 s abschätzen. Demnach fällt die Entscheidung zur Verzögerung deutlich vor der Beachtung des kreuzenden Verkehrs. Diese Ergebnisse werden durch Mages¹⁰⁹ bestätigt, der im Rahmen von Probandenversuchen in Kreuzungsszenarien eine TTI bei Bremsbeginn zwischen 3,3 s und 3,8 s identifiziert. Ebenso werden die von Fahrern akzeptierten Zeitlücken zu anderen Verkehrsteilnehmern in Kreuzungsszenarien untersucht. So ermittelt Wagner¹¹⁰ eine untere, von Fahrern akzeptierte Zeitlücke zum Querverkehr von 4,3 s. Eine von Klanner et al. durchgeführte Verkehrsbeobachtung ergibt eine durchschnittliche Zeitlücke zum Gegenverkehr beim Linksabbiegen von 3,8 s¹¹¹. Bei Untersuchungen zur Fahrerhaltensbeobachtung an Kreuzungen und Kreisverkehren wird von Kalbfleisch¹¹² eine durchschnittliche Verzögerung in der Annäherungsphase von 1-2 m/s² bei einem Verzögerungsbeginn bei $TTI=2-3$ s gemessen. Diese Werte beziehen sich jedoch auf alle beobachteten Annäherungen mit und ohne Anhalten an der Kreuzungseinfahrt. Aus den genannten Werten zeigt sich, dass die Mehrheit der Fahrer eine höhere Geschwindigkeitsreduktion vermeidet und dadurch eine stärkere Verzögerung in der späteren Annäherungsphase in Kauf nimmt. Kalbfleisch beobachtet zudem zwei unterschiedliche Annäherungsverhalten. Ein Teil der Probanden nähert sich der Kreuzung mit einer konstanten Verzögerung, während andere in einer ersten Stufe zunächst leicht und in der

¹⁰⁷ van der Horst (1990): A time-based analysis of road user behaviour in normal and critical encounters

¹⁰⁸ Definiert als Quotient aus dem Abstand zur Kreuzungseinfahrt $d_{\text{Intersection}}$ und der als konstant angenommenen Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs v_{ego} : $TTI = d_{\text{Intersection}} / v_{\text{ego}}$

¹⁰⁹ Mages (2009): Top-Down-Funktionsentwicklung eines Einbiege- und Kreuzenassistenten, S. 61

¹¹⁰ Wagner (1966): An Evaluation of Fundamental Driver Decisions and Reactions at an Intersection nach Mages (2009): Top-Down-Funktionsentwicklung eines Einbiege- und Kreuzenassistenten, S. 11

¹¹¹ Klanner et al. (2008): Fahrerhaltensuntersuchungen und Mensch-Maschine-Interaktionskonzepte für die Kreuzungsassistenz, S. 18

¹¹² Kalbfleisch (2012): Übertragung des menschlichen Fahrerhaltens an Entscheidungspunkten auf das Verhalten der Conduct-by-Wire-Automation

zweiten Stufe stärker verzögern. Untersuchungen von Berndt et al.¹¹³ zum Fahrerverhalten bei der Annäherung an eine rote Lichtsignalanlage zeigen eine breite Streuung der Verzögerung, die bei sportlichen Fahrern etwa bis zu 5 m/s² erreicht. Allgemein nimmt die Bereitschaft zu höheren Verzögerungen erwartungsgemäß mit der Entfernung zur Lichtsignalanlage, bei der der Signalwechsel zu Rot erfolgt, ab.

2.3 Fazit und Diskussion der Ergebnisse

Gegenstand dieses Kapitels ist die Analyse der von dem zu entwickelnden Interaktionskonzept zu erfüllenden Anforderungen. Hierbei bildet der in dem ersten Abschnitt beschriebene Szenarienkatalog den Entwicklungsrahmen. Durch das beschriebene Vorgehen zur Szenarienidentifikation wird eine möglichst hohe Abdeckung aller in der Realität auftretenden Szenarien gewährleistet. In den folgenden Betrachtungen erfolgt eine Ausgestaltung des Katalogs für die jeweiligen Untersuchungsgegenstände.

Die in dem zweiten Abschnitt dargestellten Betrachtungen zum Fahrerverhalten an Entscheidungspunkten ermöglichen eine erste Bewertung der Übertragbarkeit auf das Verhalten der Automation. Dies bildet die Grundlage für das zu entwickelnde kooperative Interaktionskonzept zur Entscheidungsfindung bei einer teilautomatisierten Fahrzeugführung. So bilden die identifizierten Verhaltensvorschriften aus der StVO grundlegende Anforderungen an das Verhalten der Automation. Eine Übertragung des in der Realität zu beobachtenden, nicht immer StVO-konformen Verhaltens von Fahrzeugführern auf die Automation ist, insbesondere aus produkthaftungsrechtlichen Gründen, nicht erstrebenswert¹¹⁴. Zudem ist zu erwarten, dass das beschriebene individuelle Grenzzisiko mit der Übertragung der Fahraufgabe an die Automation abnehmen wird. Hinsichtlich einer komplementären Gestaltung der Interaktion ist ein Verhalten der Automation anzustreben, das dem menschlichen Informationsverarbeitungs- und Entscheidungsprozess, insbesondere im Bezug auf die für die Informationsverarbeitung erforderliche Zeit, Rechnung trägt. Hierdurch wird gewährleistet, dass der Fahrer sowohl die Automation überwachen als auch aktiv in den Entscheidungsprozess eingebunden werden kann. Ausgehend von dieser grundlegenden Betrachtung werden die entsprechenden Anforderungen in den jeweiligen Abschnitten dieser Arbeit aufgegriffen und deren Umsetzbarkeit untersucht.

¹¹³ Berndt et al. (2007): Driver Braking Behavior during Intersection Approaches and Implications for Warning Strategies for Drivers Assistant Systems

¹¹⁴ Der Fahrer eines CbW-Fahrzeugs hat weiterhin die Möglichkeit, beispielsweise eine höhere Geschwindigkeit als die zulässige Höchstgeschwindigkeit zu wählen. Ein solches Verhalten sollte jedoch nicht durch die Automation initiiert werden.

3 Entwicklung des Interaktionskonzepts

Die Entwicklung des Interaktionskonzepts basiert auf einer Analyse der Fahraufgabe und des während der Manöverausführung entstehenden Entscheidungsbedarfs. Hieraus werden mögliche Systemausprägungen mit unterschiedlichem Automationsgrad sowie ein übergeordnetes Sicherheitskonzept abgeleitet. Dieses Kapitel schließt mit einer grundsätzlichen und von der technischen Perspektive unabhängigen Bewertung der Realisierbarkeit des entwickelten Interaktionskonzepts.

3.1 Das Gate-Konzept

Je nach ausgeführtem Fahrmanöver erreicht die in Abbildung 1-4 dargestellte Basis-Systemarchitektur in Fahrscenarien mit erhöhtem Kollisionsrisiko, in denen die Trajektorien anderer Verkehrsteilnehmer gekreuzt werden, ihre Grenzen. Diese Szenarien erzeugen zusätzlich zu der ursprünglichen Manöverentscheidung zusätzlichen Entscheidungsbedarf während der Manöverausführung bezüglich deren Fortsetzung. Während der Manöverausführung lassen sich „Konfliktpunkte“, definiert als Schnittpunkt der Trajektorie des Ego-Fahrzeugs mit jener der anderen Verkehrsteilnehmer, identifizieren. Plavsic¹¹⁵ nutzt die Analyse von Konfliktpunkten in Kreuzungsszenarien zur Analyse der Fahreraufgabe und des zur Szenariobewältigung erforderlichen Informationsbedarfs und leitet hieraus mögliche Assistenzfunktionen aus einer Blickbewegungsanalyse ab. Plavsic unterteilt die Szenarien in unterschiedliche Phasen und betrachtet die Teilaufgaben des Fahrers in diesen Phasen als parallele und kontinuierliche Informationsverarbeitungsprozesse der Umfeldwahrnehmung und der Entscheidungsfindung.

Das Vorgehen in dieser Arbeit zur Entwicklung eines Interaktionskonzepts für die kooperative Entscheidungsfindung bei einer manöverbasierten Fahrzeugführung folgt einem ähnlichen Ansatz. Das Ziel besteht in der Identifikation von Entscheidungspunkten, an denen die Manöverfortführung infrage gestellt wird, um Konfliktpunkte zu vermeiden. Die Positionsbestimmung dieser Entscheidungspunkte erfolgt dabei in Abhängigkeit der Szenerie und der in Abschnitt 2.2.1 beschriebenen Verhaltensvorschriften. Aus den auf diese Weise identifizierten Entscheidungspunkten lässt sich im nächsten Schritt der für die Entscheidungsfindung erforderliche Informationsbedarf ableiten.

¹¹⁵ Plavsic (2010): Analysis and Modeling of Driver Behavior for Assistance Systems at Road Intersections, S. 84 ff.

Im Gegensatz zu dem Vorgehen von Plavsic handelt es sich bei diesen Punkten nicht um die Konfliktpunkte selbst, sondern um die Punkte bis zu denen eine Entscheidung spätestens getroffen werden muss, um die Entstehung von Konfliktpunkten zu vermeiden. Somit besteht der den Entscheidungspunkten zugewiesene Informationsbedarf aus einer Aggregation aller für die Entscheidungsfindung erforderlichen Informationen. Das aus diesen Überlegungen abgeleitete Interaktionskonzept ist das erstmals von Geyer et al.¹¹⁶ vorgestellte „Gate-Konzept“¹¹⁷, das in einer Segmentierung der Manöverausführung besteht. Die Gates¹¹⁸ markieren dabei die beschriebenen Entscheidungspunkte entlang der geplanten Trajektorie, an denen eine Entscheidung über die Fortsetzung der Manöverausführung zu treffen ist. Jedem Gate ist ein Informationscluster zugewiesen, das die verschiedenen, an diesem Punkt für die Entscheidungsfindung erforderlichen Informationen umfasst.

Das Gate-Konzept ist in Abbildung 3-1 für ein exemplarisches Szenario dargestellt. Das CbW-Fahrzeug fährt in eine X-Kreuzung, an der die Vorfahrtsregelung „Rechts-vor-Links“ gilt, aus Richtung Süden kommend ein und biegt links ab. Während der Manöverausführung ist eine Sequenz von zwei Gates zu passieren. Das erste Gate „Intersection entry (I,E)“ ist an der Kreuzungseinfahrt positioniert. Für die Entscheidung, ob eine sichere Fortsetzung der Ausführung des Linksabbiegemanövers bis zum nächsten Gate möglich ist, müssen die sich der Kreuzung nähernden vorfahrtsberechtigten Verkehrsteilnehmer aus Richtung Osten berücksichtigt werden. Zudem ist der für die Manöverausführung erforderliche Freiraum zwischen den beiden Gates zu überprüfen. Um das zweite Gate „Intersection left (I,L)“ zu passieren, müssen entgegenkommende Verkehrsteilnehmer aus Richtung Norden sowie die Fläche bis zur Kreuzungsausfahrt in die Entscheidungsfindung einbezogen werden.

¹¹⁶ Geyer et al. (2011): Development of a Cooperative System Behavior for a Highly Automated Vehicle Guidance Concept based on the Conduct-by-Wire Principle

¹¹⁷ Gate aus dem Englischen für Tor, Pforte oder Tür

¹¹⁸ Im Folgenden werden die Begriffe „Gates“ und „Entscheidungspunkte“ synonym verwendet.

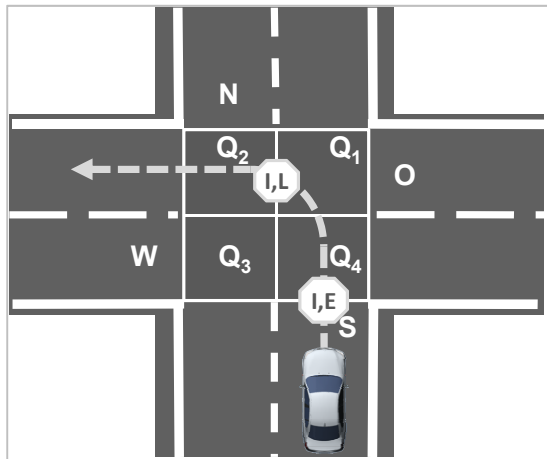


Abbildung 3-1: Exemplarisches Szenario mit identifizierten Gates (Kreuzungsquadranten Q_i , Gate-Positionen I,E und I,L und Himmelsrichtung der Kreuzungszufahrten)

3.1.1 Ableitung von Systemausprägungen

Das zuvor beschriebene Gate-Konzept bildet die Grundlage für die systematische Ableitung unterschiedlicher Systemausprägungen. Ausgehend von der Betrachtung der konventionellen Fahrzeugführung, bei der der Fahrer die Entscheidungen während der Manöverausrührung eigenständig trifft, kann der Fahrer eines CbW-Fahrzeugs bei der Annäherung an ein Gate in kooperativer Weise durch die Automation unterstützt werden. Die sich hieraus ergebenden Systemausprägungen unterscheiden sich in ihrem Automationsgrad. Die Definition dieser Automationsgrade im Kontext der teilautomatisierten Fahrzeugführung erfordert eine Betrachtung der potentiellen Fehler bei der Entscheidungsfindung durch die Automation:

Bei der Interpretation einer Fahrsituation sind grundsätzlich zwei mögliche Fehlertypen zu vermeiden: Falsch-Positiv-Fehler (auch bekannt als Beta- oder Typ II Fehler)¹¹⁹ und Falsch-Negativ-Fehler (auch bekannt als Alpha- oder Typ I Fehler)¹²⁰. Während die Automation bei Falsch-Positiven-Fehlern ein Objekt erkennt, wo sich in Wirklichkeit keines befindet, was zu nicht situationsgerechten Handlungen führen kann, erkennt die Automation ein existierendes Objekt bei Falsch-Negativ-Fehlern nicht, wodurch situationsgerechte Handlungen ausbleiben können.

Die Herausforderung bei der Entwicklung einer Systemarchitektur besteht darin, dass Maßnahmen zur Reduktion der Auftretenswahrscheinlichkeit einer der beiden Fehlerarten automatisch zu einer Erhöhung der anderen führt. Systemarchitekturen für vollautomatisierte Fahrzeugführungskonzepte sind daher meist auf einem komplexen Sicher-

¹¹⁹ Vogt et al. (2011): Dictionary of statistics & methodology, S.7

¹²⁰ Vogt et al. (2011): Dictionary of statistics & methodology, S.27

heitskonzept, wie es exemplarisch von Hörwick und Siedersberger¹²¹ beschrieben wird, und auf konservativen Entscheidungsstrategien, die mehr Falsch-Positive-Fehler zulassen, aufgebaut. Dies führt dazu, dass die Fehlerbehandlungsstrategien recht zeitaufwändig werden, da unterschiedliche Entscheidungsalternativen mit zunehmendem potentielltem Risiko sequentiell bewertet werden müssen¹²².

Die teilautomatisierte Fahrzeugführung bietet im Vergleich zu vollautomatisierten Konzepten den Vorteil, den menschlichen Fahrer, dessen Fähigkeiten zur Beurteilung, ob eine positive Detektion richtig oder falsch ist, die der Automation übertreffen¹²³, zu integrieren und den Entscheidungsprozess somit deutlich zu verkürzen. Ebenso zeigt sich bei der konventionellen Fahrzeugführung, dass der menschliche Fahrer in der Lage ist, komplexe Fahrsituationen zu analysieren und situationsabhängig Entscheidungsalternativen abzuleiten. Die Integration des menschlichen Fahrers als zusätzliche Entscheidungsinstanz zur Erhöhung der Beherrschbarkeit automatisierter Fahrzeugführungskonzepte ist daher die Motivation der kooperativen Fahrzeugführung¹²⁴.

Aus diesen Überlegungen lassen sich für die teilautomatisierte Fahrzeugführung somit drei unterschiedliche Systemausprägungen mit zunehmenden Automationsgrad definieren:

- **Systemausprägung „Anzeige“ (niedrigster Automationsgrad):** Die Automation zeigt dem Fahrer das nächste Gate an, die Entscheidung erfolgt durch den Fahrer (expliziter Befehl).
- **Systemausprägung „Vorschlag“ (mittlerer Automationsgrad):** Die Automation zeigt dem Fahrer das nächste Gate an und macht einen Entscheidungsvorschlag, die endgültige Entscheidung (explizite Bestätigung des Vorschlags oder Ablehnen durch einen anderen Befehl) erfolgt durch den Fahrer.
- **Systemausprägung „Entscheidung“ (höchster Automationsgrad):** Verantwortungsteilung zwischen Fahrer und Automation in Abhängigkeit des bei der Entscheidung möglichen Fehlers. Im Falle von Entscheidungen mit potentielltem Falsch-Positiv-Fehler, bspw. der Entscheidung vor dem Kreuzungsbereich anzuhalten, da dieser durch andere Objekte belegt ist, gleicht das Verhalten der Automation dem des mittleren Automationsgrades: Die Automation zeigt dem Fahrer das nächste Gate an, macht einen Entscheidungsvorschlag und die endgültige

¹²¹ Hörwick et al. (2010): Strategy and Architecture of a Safety Concept for Fully Automatic and Autonomous Driving Assistance Systems

¹²² Urmson et al. (2008): Autonomous Driving in Urban Environments: Boss and the Urban Challenge, S. 451

¹²³ Winner et al. (2012): Quo vadis, FAS?, S. 664

¹²⁴ Hakuli et al. (2012): Kooperative Automation

Entscheidung liegt beim Fahrer. Entscheidungen mit potentiellm Falsch-Negativ-Fehler, beispielsweise der Entscheidung den Kreuzungsbereich zu passieren, da dieser frei ist, werden von der Automation getroffen, wobei der Fahrer über die Entscheidung und daraus resultierende Handlungen informiert wird.

In Abbildung 3-2 sind die beiden möglichen Fehlerarten bei der Entscheidungsfindung an einer Kreuzung illustriert. Ausgehend von der realen Situation eines freien oder belegten Kreuzungsbereichs kann die Automation über die maschinelle Umfelderkennung zu einer korrekten oder falschen Interpretation gelangen. Bezogen auf die Systemausprägung „Entscheidung“ bedeutet dies, dass die Automation die Entscheidung zum Passieren der Kreuzung eigenständig trifft und dem Fahrer im Falle einer als belegt erkannten Kreuzung einen Vorschlag zum Anhalten macht und diesen auch durchführt, solange vom Fahrer kein anderer Befehl erfolgt.

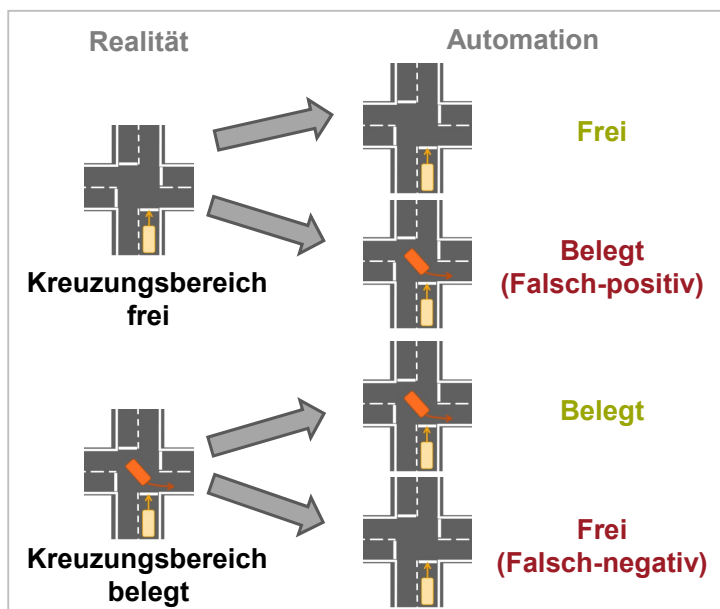


Abbildung 3-2: Fehlerunterscheidung bei der Entscheidungsfindung durch die Automation

Die unterschiedlichen Systemausprägungen und die Aufgabenverteilung zwischen den beiden Interaktionspartnern Fahrer und Automation bei der Entscheidungsfindung an den Gates ist in Abbildung 3-3 in Form eines UML-Interaktionsdiagramms dargestellt. Hierbei ist die Entscheidung des Fahrers gemäß der UML-Nomenklatur als asynchrone Nachricht gekennzeichnet, da dieser jederzeit und unabhängig von der Automation erfolgen kann.

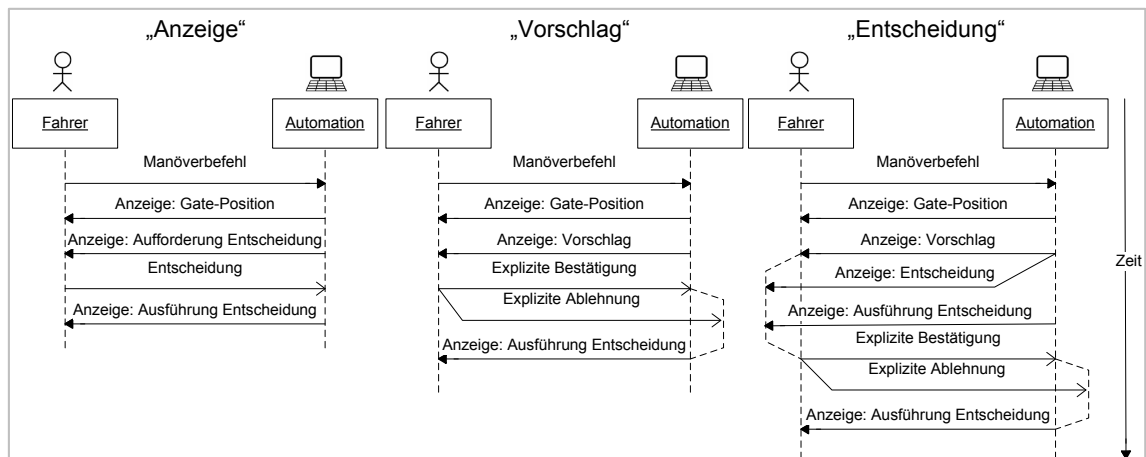


Abbildung 3-3: UML-basierte Darstellung der Interaktion zwischen Fahrer und Automation für die drei Systemausprägungen „Anzeige“, „Vorschlag“ und „Entscheidung“

3.1.2 Sicherheitskonzept

Das beschriebene Interaktionskonzept bildet die Grundlage für eine kooperative Entscheidungsfindung von Fahrer und Automation. Das elementare Sicherheitskonzept besteht in der gegenseitigen Überwachung der beiden Entscheidungsinstanzen (Fahrer und Automation), auch nach einer getroffenen Entscheidung. So hat der Fahrer gemäß dem Grundsatz des CbW-Konzepts zu jedem Zeitpunkt die Möglichkeit in die Fahrzeugführung einzugreifen und die Entscheidung der Automation zu korrigieren. Ebenso kann die Automation eine Fahrerentscheidung je nach Automationsgrad durch eine Handlungsempfehlung („Vorschlag“) oder einen aktiven Eingriff („Entscheidung“) beeinflussen. Als letzte Eskalationsstufe wird, unabhängig vom Automationsgrad, ein Notbremsmanöver zur Kollisionsvermeidung eingeleitet.

Die bisherigen Betrachtungen setzen voraus, dass mindestens einer der beiden Interaktionspartner eine Entscheidung über das Verhalten am Gate treffen kann. Darüber hinaus ist das Verhalten der Automation für den Fall zu definieren, in dem keiner von beiden eine Entscheidung treffen kann. Ein möglicher Ansatz wäre, dass die Automation die Manöverausführung so lange fortsetzt, bis der Fahrer eingreift. Aufgrund des beschriebenen potentiellen Risikos in Form der Kollisionspunkte, stellt dies jedoch keine bevorzugte Lösung dar. Aus diesem Grund ist eine Erweiterung des elementaren Sicherheitskonzepts erforderlich, die für alle Systemausprägungen Gültigkeit besitzt. In den Fällen, in denen weder vom Fahrer noch von der Automation eine Entscheidung getroffen werden kann, bleibt das Gate, bildlich gesprochen, „geschlossen“. Dies bedeutet, dass das aktuell ausgeführte Manöver zurückgestellt und das Fahrzeug automatisch in einen

sicheren Zustand, dem Stillstand am Gate¹²⁵, überführt wird. Sobald das Gate „freigeschaltet“ wird, erfolgt die Reaktivierung des im Speicher abgelegten Manövers. Das Gate-Konzept führt zu der in Abbildung 3-4 dargestellten Erweiterung der CbW-Systemarchitektur auf der Bahnführungsebene. Die Erweiterung besteht aus der Gate-Steuerung („Gate Control“), die der Manöversteuerung („Maneuver Control“) mit dem in Abschnitt 1.3.2 beschriebenen Funktionsumfang vorgeschaltet ist. Die Gate- und die Manöversteuerung werden in dem Manövermanagement zusammengefasst.

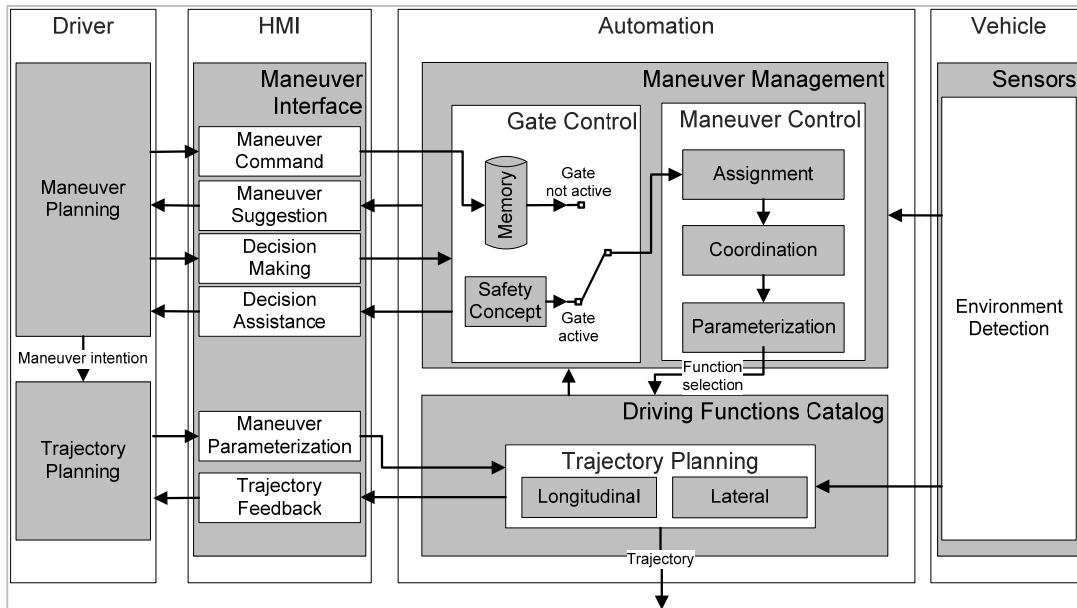


Abbildung 3-4: Um die Gate-Steuerung („Gate Control“) erweiterte Systemarchitektur auf der Bahnführungsebene (basierend auf Geyer et al.¹²⁶ und Hakuli et al.¹²⁷)

3.2 Anwendung des Gate-Konzepts auf den CbW-Szenarien katalog

Aus dem Fokus dieser Arbeit, der Untersuchung der Realisierbarkeit des Gate-Konzepts, ergeben sich zwei grundsätzliche Fragestellungen.

Einerseits ist zu überprüfen, ob das Gate-Konzept auf repräsentative Szenarien, die ein CbW-Fahrzeug bewältigen muss, anwendbar ist. Eine Grundvoraussetzung hierfür ist,

¹²⁵ Der Stillstand am Gate ist ein möglicher sicherer Zustand für die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Szenarien.

¹²⁶ Geyer et al. (2012): Ermittlung der Anforderungen an die Umfelderkennung für Conduct-by-Wire, S. 4

¹²⁷ Hakuli et al. (2010): Development and Validation of Manoeuvre-Based Driver Assistance Functions for Conduct-by-Wire with IPG CarMaker

dass sich die Anzahl und die Position der während der Ausführung des vom Fahrer beauftragten Manövers zu passierenden Gates eindeutig bestimmen lassen. Gleiches gilt für den den Gates zugewiesenen Informationsbedarf für die Entscheidungsfindung. Dies führt zu der folgenden Hypothese:

H 1 *Für repräsentative Szenarien lassen sich die Anzahl und die Position der Entscheidungspunkte, die während der Manöverausführung zu passieren sind sowie der den Entscheidungspunkten zugewiesene Informationsbedarf immer eindeutig bestimmen.*

Hypothese H 1 stellt somit die elementare Hypothese dar. Für die Szenarien, die zu einer Falsifikation dieser Hypothese führen, ist das Gate-Konzept, unabhängig von der technischen Lösung, nicht realisierbar.

Eine Bewährung von Hypothese H 1 vorausgesetzt, ist zudem zu untersuchen, ob sich für eine Kombination aus Fahrmanöver und Szenerieklasse, beispielsweise die Kombination des Manövers "Linksabbiegen" mit allen Szenerien der Klasse „Kreuzung“, immer eine identische Folge von Entscheidungspunkten bezüglich Anzahl und Position ergibt. Hierdurch ließe sich ein identisches und damit für alle Szenerien einer Klasse konsistentes Verhalten der Automation ableiten. Dies führt zu folgender Hypothese:

H 2 *Kombinationen identischer Manöver mit Szenerien einer Klasse führen immer zu einer identischen Folge von Entscheidungspunkten entlang der geplanten Trajektorie zur Manöverausführung.*

3.2.1 Gate-Identifikation und Analyse des Informationsbedarfs

Zur Untersuchung von Hypothese H 1 wird das Gate-Konzept auf eine Vielzahl von Szenarien angewandt. Die Ermittlung der Szenarien erfolgt hierbei gemäß der in Abschnitt 2.1.2 beschriebenen Methodik. Die systematisch ermittelten Szenerien¹²⁸ werden mit den jeweils zulässigen Manövern des CbW-Fahrzeugs zu insgesamt 400 Szenarien verknüpft. So ergibt sich beispielsweise die Kombination der Szenerie „X-Kreuzung“ mit den Manövern „Linksabbiegen“, „Kreuzung passieren“, „Rechtsabbiegen“ und „Wenden“. Die in dieser frühen Konzeptphase durchgeführte Gate-Identifikation und Analyse des Informationsbedarfs beschränkt sich auf die grundlegende Betrachtung regulärer Szenarien, die im öffentlichen Straßenverkehr auftreten können. Der Katalog umfasst keine Szenarien mit erhöhtem Risiko, welches durch andere Verkehrsteilnehmer (beispielsweise „vorausfahrendes Fahrzeug verliert Ladung“), deren Fehlverhalten

¹²⁸ Der dieser Arbeit zu Grunde gelegte Szeneriekatalog ist Anhang A zu entnehmen.

(beispielsweise Missachtung der Vorfahrtsregelung) oder eine Fehlfunktion der CbW-Automation hervorgerufen wird¹²⁹.

Im Folgenden werden die Ergebnisse exemplarisch für die in Abbildung 3-5 skizzierten Szenarien dargestellt. Bei diesen Szenarien nähert sich das CbW-Fahrzeug der Vorfahrtsstraße folgend einer X-Kreuzung aus Richtung Süden. Für die vier zulässigen Manöver lassen sich insgesamt vier Gates identifizieren, deren Position wie folgt definiert ist:

- **Intersection, entry (I,E):** Schnittpunkt Ego-Fahrzeug mit virtueller Verbindungslinie zwischen der unterbrochenen Begrenzung der gekreuzten Straße
- **Intersection, left (I,L):** Schnittpunkt Ego-Fahrzeug mit gestrichelter, vertikaler Verbindungslinie¹³⁰ zwischen Begrenzungslinie des entgegenkommenden kreuzenden Fahrstreifens aus Richtung Norden und gegenüberliegender Kreuzungsausfahrt
- **Intersection, right (I,R):** Schnittpunkt Ego-Fahrzeug mit parallel um 0,5 m zur Verbindungslinie zwischen Begrenzungslinie der Ego-Zufahrt und der Begrenzungslinie der gegenüberliegenden Ausfahrt verlaufender virtueller Linie¹³¹.
- **Intersection, turn (I,T):** Schnittpunkt Ego-Fahrzeug mit gestrichelter, vertikaler Verbindungslinie zwischen Begrenzungslinie des entgegenkommenden kreuzenden Fahrstreifens aus Richtung Norden und gegenüberliegender Kreuzungsausfahrt.

Der diesen Gates für die Entscheidungsfindung zugewiesene Informationsbedarf ist Abbildung 3-5 für die jeweiligen Manöver zu entnehmen. Bei dieser Analyse wird für alle Verkehrsteilnehmer ein regelkonformes Verhalten gemäß der Straßenverkehrsordnung angenommen.

¹²⁹ Einen derartigen Katalog beschreiben beispielsweise Flemisch et al. (2009): Validation of preliminary design by simulation, S. 23

¹³⁰ Dies entspricht einer möglichen Szenerieausprägung. Mögliche Fallunterscheidung s. Anhang C.1

¹³¹ Annahme für einen in der StVO §5.8 und StVO §9.3 nicht näher definierten einzuhaltenden seitlichen Abstand, der Fahrradfahrern und Mofa-Fahrern das Passieren rechts neben dem Ego-Fahrzeug ermöglicht.

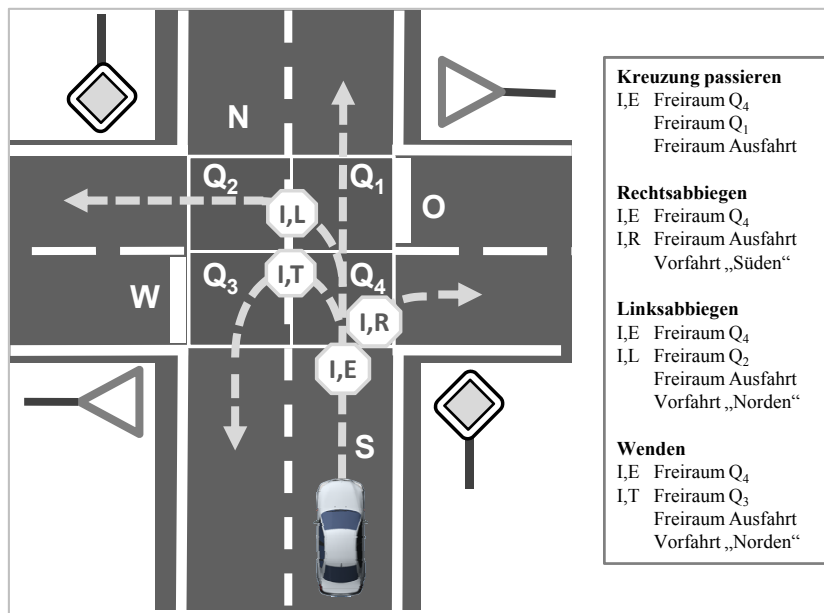


Abbildung 3-5: Identifikation der Gates und Analyse des Informationsbedarfs für exemplarische Kreuzungsszenarien

Die Analyse für alle Szenarien des Katalogs ergibt, dass sich die Anzahl und die Position der Gates sowie der den Gates zugewiesene Informationsbedarf eindeutig definieren lässt. Unterschiedliche Definitionen der Gate-Position ergeben sich in Abhängigkeit der Strukturierung der Szenerie durch Fahrbahnmarkierungen und im Falle von Gate I,R in Abhängigkeit der gewählten Trajektorie bei der Ausführung des Rechtsabbiege- manövers.

In einem zweiten Schritt wird die Widerspruchsfreiheit der identifizierten Gates für die Kombination von Manövern mit komplexeren Szenerien, die auf einer Kombination von Merkmalen verschiedener Szenerieklassen basieren, untersucht. Hierbei lassen sich für die in Abschnitt 2.1.2 beschriebene Methodik zur Szeneriegenerierung folgende Ergebnisse festhalten:

- Die für die Szenarien aus Szenarien einer Szeneriekategorie getrennt definierten Gates und deren Position lassen sich auf Szenarien mit Szenarien höherer Komplexität widerspruchsfrei übertragen.
- Eine Fusion von Gates kann erfolgen, sofern sich zwei Gate-Positionen gleichen.
- Eine Fusion von Gates muss erfolgen, sofern ein Anhalten vor dem Gate, gemäß dem zuvor beschriebenen Sicherheitskonzept, nicht regelkonform zur Straßenverkehrsordnung ist.

In Abbildung 3-6 sind zwei exemplarische Szenarien dargestellt, in denen jeweils zwei Gates fusioniert werden. In dem linken Szenario weisen das Gate für den kreuzenden Fußgängerüberweg (CT,E) und das für die Kreuzungseinfahrt (I,E) aufgrund der Lichtsignalanlage per Definition die gleiche Position auf, so dass beide Gates zu einem ge-

meinsamen Gate fusioniert werden können. In dem rechten Szenario ist ein Anhalten vor dem Fußgängerüberweg aufgrund des geringen Abstands zur Kreuzung und einer damit verbundenen Behinderung des Verkehrs auf der Vorfahrtsstraße unzulässig. In diesem Fall wird die Sequenz von ursprünglich drei auf zwei zu passierende Gates reduziert und die Gates CT,E mit I,L fusioniert.

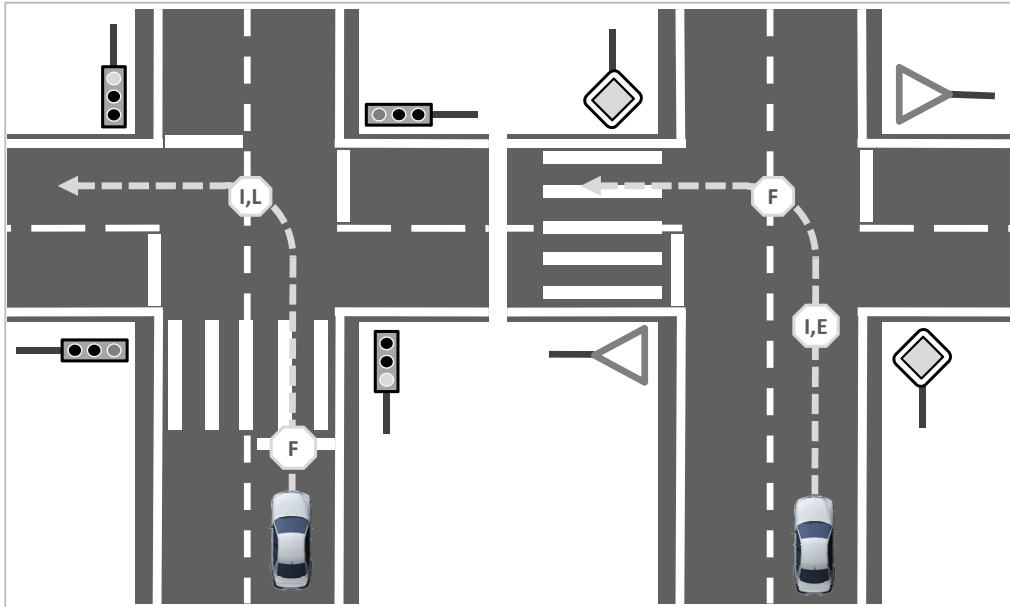


Abbildung 3-6: Beispielszenarien, in denen jeweils zwei Gates zu einem Gate (F) fusioniert. Links: I,E und CT,E; rechts: I,L und CT,E

3.2.2 Konsistenzanalyse

Basierend auf den Ergebnissen der Gate-Identifikation lässt sich Hypothese H 2 untersuchen. Hierfür werden die Gate-Sequenzen für Kombinationen identischer Manöver mit allen Szenarien einer Klasse des zuvor entwickelten Szenariekatalogs verglichen. Das Ergebnis dieses Vergleichs zeigt, dass bestimmte Szenarieparameter einen Einfluss auf die zu passierende Gate-Sequenz bei der Manöverausführung haben können. Dies ist in Abbildung 3-7 für das Beispielsszenario dargestellt. Die ursprünglich identifizierte Folge von zwei zu passierenden Gates für das Linksabbiegemanöver an einer X-Kreuzung, der sich das CbW-Fahrzeug der Vorfahrtstraße folgend nähert, kann sich durch Änderung der Vorfahrtsregelung oder der Anzahl der Zufahrtsrichtungen beispielsweise auf ein Gate reduzieren. Während sich die Manöverausführung in dem Ausgangsfall in zwei Abschnitte unterteilen lässt, so ist die Entscheidung über die Fortsetzung der Manöverausführung in den beiden anderen Varianten bereits an der Kreuzungseinfahrt zu treffen.

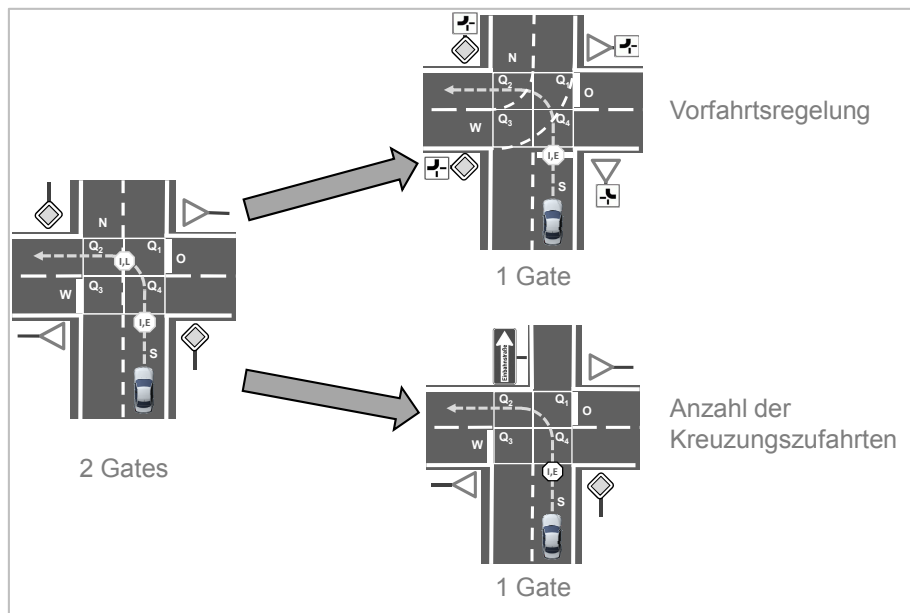


Abbildung 3-7: Exemplarische Darstellung des Einflusses von Szenarieparametern auf die Gate-Sequenz bei einem Linksabbiegemanöver an einer X-Kreuzung

Die für alle Szenarien durchgeführte Analyse zeigt, dass die in Tabelle 3-1 aufgeführten Parameter und Merkmale einen Einfluss auf die Anzahl und die Position der für ein Szenario identifizierten Gates haben können. Wie in Abschnitt 2.1.2 beschrieben, kann der Lösungsraum durch eine systematische Kombination von Szenarieklassen erweitert werden. In Abhängigkeit der in Abschnitt 3.2.1 definierten Regeln für die Fusion von Gates, behalten die in Tabelle 3-1 identifizierten Parameter ihre Gültigkeit.

Tabelle 3-1: Auflistung der die Gate-Folge und die Gate-Positionen beeinflussenden Parameter

Klasse	Szenerie	Parameter
Kreuzung	X-Kreuzung/Sternkreuzung ¹³² T-Kreuzung	Vorfahrtsregelung Zufahrtsrichtung Anzahl der Kreuzungszufahrten Geometrie
	Verkehrinsel	Vorfahrtsregelung
	Wendefahrbahn	Vorfahrtsregelung
Kreisverkehr	Kreisverkehr	Vorfahrtsregelung Geometrie
	Bypass	Vorfahrtsregelung
Querverkehr	Fußgängerüberweg Fahrradweg Bahnübergang	Vorfahrtsregelung
	Fahrtsreifenende	Rechts/links
	Hindernis ausweichen	Rechts/links
Längsverkehr	Sonderfahrstreifen	Rechts/links
	Lichtsignalanlage	-

3.3 Fazit und Diskussion der Ergebnisse

Das in diesem Kapitel eingeführte Gate-Konzept entspricht einem aus Sicht der Automation und unter Berücksichtigung der in Kapitel 2 definierten Anforderungen entwickelten Interaktionskonzept zur kooperativen Entscheidungsfindung von Fahrer und Automation während der Manöverausführung. Ausgehend von den theoretischen Betrachtungen zu möglichen Systemausprägungen und der Gestaltung eines Sicherheitskonzepts zeigt die im zweiten Abschnitt vorgestellte Untersuchung die grundsätzliche Anwendbarkeit des Gate-Konzepts auf repräsentative Szenarien. So lässt sich für alle untersuchten Szenarien unterschiedlicher Komplexität die Anzahl und die Position der während der Manöverausführung zu passierenden Gates sowie der den Gates zugewiesene Informationsbedarf eindeutig bestimmen. Somit hat sich **Hypothese 1 bewährt**.

¹³² X- und Sternkreuzung weisen für die vier untersuchten Manöver die identischen Gate-Sequenzen auf. Die Szenarien unterscheiden sich lediglich hinsichtlich der Wahl der Zielausfahrt und einer damit verbundenen longitudinalen Verschiebung der Gate-Positionen I,L und I,R. Ferner nimmt der Informationsbedarf an den Gates einer Sternkreuzung im Vergleich zu einer X-Kreuzung aufgrund der Berücksichtigung zusätzlicher Kreuzungszufahrten zu.

Dieses Ergebnis bedeutet, dass die Anwendbarkeit des Gate-Konzepts, unabhängig von der technischen Realisierung, nicht widerlegt werden kann.

Hinsichtlich der Konsistenz von Manöver und Szenerie zeigt sich, dass verschiedene, die Szenerie beschreibende Merkmale zu Unterschieden hinsichtlich der Gate-Sequenz führen können. **Hypothese 2** ist demnach **falsifiziert**. Da eine Falsifikation bereits für die Betrachtung einzelner Szenerieklassen erfolgt, wird an dieser Stelle auf eine detaillierte Ergebnisdarstellung für Szenarien aus komplexeren Szenerien verzichtet. Aus diesem Ergebnis lassen sich bezüglich der Umsetzung des Gate-Konzepts grundsätzlich drei Lösungen ableiten, die im Folgenden bewertet werden:

- **Lösung 1 (Maximale Gate-Anzahl):** Für ein Szenario wird immer die für eine Szenarioklasse maximal identifizierte Anzahl an Gates zu Grunde gelegt.
- **Lösung 2 (Minimale Gate-Anzahl):** Für ein Szenario wird immer das für alle Szenarien einer Klasse erste Gate zu Grunde gelegt.
- **Lösung 3 (Szenerieabhängige Gate-Anzahl):** Szenerieabhängige Umsetzung der Gate-Sequenz.

Die ersten beiden Lösungen sind aus unterschiedlichen Gründen nicht zu favorisieren. Dies lässt sich bereits anhand von Szenarien skizzieren, die auf Szenerien einer Klasse basieren. Wie den Ergebnissen in diesem Abschnitt zu entnehmen ist, sind während eines Linksabbiegemanövers an Kreuzungen maximal zwei Gates zu passieren. Ein zweites Gate I,L beim Folgen einer abknickenden Vorfahrtstraße wäre für den Fahrer eines CbW-Fahrzeugs vermutlich primär störend und daher nicht akzeptabel. Im Falle des rechten Beispielszenarios aus Abbildung 3-7, bei dem sich das CbW-Fahrzeug der X-Kreuzung mit einer abknickenden Vorfahrtsstraße auf der niederrangigen Zufahrtsstraße nähert, würde dies jedoch bedeuten, dass ein zweites Gate auf der Kreuzungsmitte zu passieren wäre. Dieses Verhalten ist nicht nur in dem beschriebenen Szenario unnötig, sondern im Falle der Unterbrechung des Abbiegemanövers am Gate risikobehaftet und daher gemäß der Straßenverkehrsordnung¹³³ nicht zulässig.

Lösung 2 bedeutet für das Beispiel der Klasse der Kreuzungen, dass nur das erste Gate I,E an der Kreuzungseinfahrt zu passieren ist. Eine Entscheidung über die Fortsetzung der Manöverausführung ist an dieser Stelle jedoch nicht in allen Szenarien möglich, beziehungsweise zulässig.

Diese Analyse führt zu der Schlussfolgerung, dass Lösung 3 zu verfolgen und somit die die Szenerie einer Klasse beschreibenden und die nach Tabelle 3-1 die Gate-Sequenz beeinflussenden Parameter bei der Manöverausführung berücksichtigt werden müssen. Dies führt zu höheren Anforderungen an die maschinelle Umfeldwahrnehmung in den

¹³³ § 8.2 StVO: „Wer die Vorfahrt zu beachten hat [...] darf nur weiterfahren, wenn er übersehen kann, dass er den, der die Vorfahrt hat, weder gefährdet noch wesentlich behindert.“

betrachteten Szenarien und an die Fähigkeit der Automation, die Szenerie hinreichend genau zu identifizieren¹³⁴. Ferner ist zu untersuchen, ob sich in diesem Fall ein für den Fahrer transparentes Systemverhalten der Automation in den unterschiedlichen Szenarien darstellen lässt.

¹³⁴ Vgl. Kapitel 5

4 Funktionsumfang der Automation

Kapitel 3 beschreibt die grundsätzliche Anwendbarkeit des basierend auf den in Kapitel 2 definierten Anforderungen entwickelten Interaktionskonzepts. Hierbei werden für repräsentative Szenarien die zu passierenden Gate-Sequenzen identifiziert und der für die Entscheidungsfindung zu deckende Informationsbedarf untersucht. In diesem Kapitel wird die regelungstechnische Realisierung des Gate-Konzepts weiter konkretisiert. Im Folgenden werden die realisierte Gate-Steuerung und die Gate-Annäherungsfunktion beschrieben.

4.1 Integration des Gate-Konzepts in die CbW-Systemarchitektur

Die Integration des Gate-Konzepts erfordert die in Abschnitt 3.1 beschriebenen Erweiterungen. Die Aufgabe der Gate-Steuerung besteht im Falle einer ausbleibenden Entscheidung bezüglich der Fortsetzung der Manöverausführung an dem nächsten identifizierten Gate darin, die aktuelle Manöverausführung zu unterbrechen und das Fahrzeug in den sicheren Zustand des Stillstands am Gate zu überführen beziehungsweise in diesem Zustand zu halten. Neben dieser der Bahnführungsebene zuzuordnenden Erweiterung der Systemarchitektur ist auf der Stabilisierungsebene eine funktionale Erweiterung zur Ausführung des Gate-Annäherungsmanövers erforderlich.

4.1.1 Gate-Steuerung

Die möglichen Systemzustände und Zustandsübergänge der Gate-Steuerung sind in Abbildung 4-1 dargestellt. Der Ausgangszustand ist durch „Gate not active“ definiert. In diesem Zustand erfolgt keine Berücksichtigung der in dem jeweiligen Szenario zu passierenden Gates und somit keine Unterbrechung des vom Fahrer beauftragten Manövers. Sobald während der Manöverausführung ein zu passierendes Gate identifiziert wird, erfolgt eine automatische Transition in den Zustand „Gate stand-by“. In diesem Zustand ist das nächste zu passierende Gate zunächst geschlossen, es erfolgt jedoch noch keine Unterbrechung der Manöverausführung. Aus diesem Zustand gibt es zwei mögliche Zustandsübergänge. Das betroffene Gate kann, je nach Automationsgrad, vom Fahrer oder der Automation, freigeschaltet werden, wodurch wieder der Ausgangszustand „Gate not active“ erreicht wird. Andernfalls und sobald die Übergangsbedingung erfüllt ist, erfolgt eine automatische Überführung in den Zustand „Gate active“. In

diesem Zustand wird das vom Fahrer beauftragte Manöver zurückgestellt und durch ein Sicherheitsmanöver, mit dem Ziel das Fahrzeug in einen sicheren Zustand, dem Stillstand am Gate zu überführen, ersetzt. Der Zustand „Gate active“ kann dabei zwei Regelzustände aufweisen. Dies sind „Gate approach“, sofern sich das Fahrzeug noch nicht im Stillstand am Gate befindet, und „Gate hold“, der das Halten des Fahrzeugs im Stand kennzeichnet. Das Freischalten des Gates durch den Fahrer oder die Automation führt wieder in den Ausgangszustand „Gate not active“. Im Falle einer Sequenz von mehreren in einem Szenario zu passierenden Gates erfolgt nach Freischaltung eines Gates umgehend eine automatische Transition in „Gate stand-by“ für das nächste zu passierende Gate.

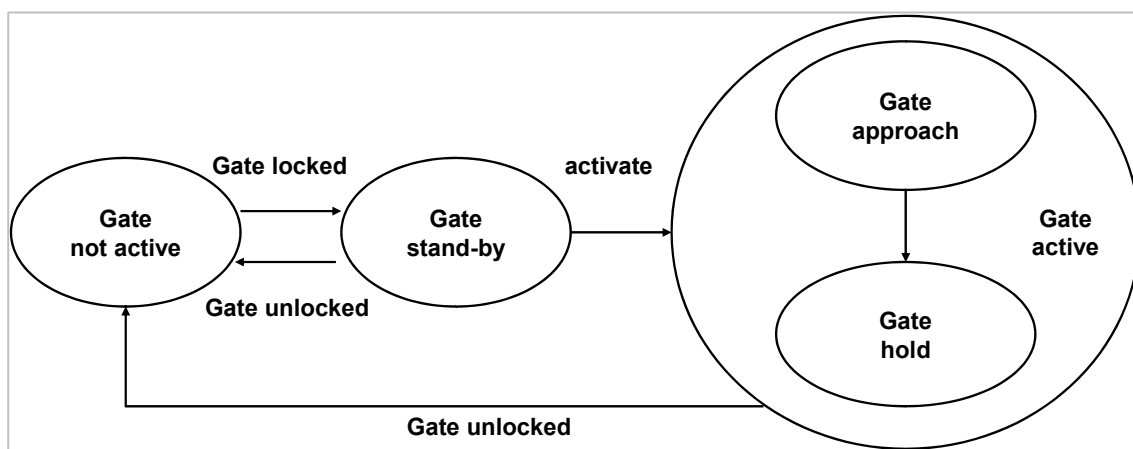


Abbildung 4-1: Zustände und Übergänge der Gate-Steuerung

4.1.2 Gate-Annäherungsfunktion

Wie zuvor beschrieben, wird durch Erreichen des Zustands „Gate active“ der Gate-Steuerung das aktuell ausgeführte Manöver durch ein Sicherheitsmanöver ersetzt. In diesem Zustand existieren zwei Regelzustände mit den Regelzielen das Fahrzeug am Gate zum Stehen zu bringen („Gate approach“) oder dieses am Gate im Stillstand zu halten („Gate hold“). Die funktionale Umsetzung dieser beiden Manöver erfolgt gemäß der grundlegenden CbW-Systemarchitektur nach Hakuli et al.¹³⁵. Hierbei wird jedem Manöverbefehl von der Manöversteuerung situationsabhängig eine Paarung aus einer longitudinalen und einer lateralen Fahrfunktion, deren Aufgabe die Trajektorienplanung und die Berechnung der Stellgrößen für die Aktorik auf der Stabilisierungsebene ist, zugewiesen.

Zur Ausführung des Sicherheitsmanövers, das die Ausführung des vom Fahrer beauftragten Manövers unterbricht, ist ein Eingriff in die Längsführung des Fahrzeugs unter

¹³⁵ Hakuli et al. (2010): Development and Validation of Manoeuvre-Based Driver Assistance Functions for Conduct-by-Wire with IPG CarMaker

Beibehaltung des geplanten Kurses und somit der Querführung erforderlich. Demnach bleibt im Falle der Aktivierung des Sicherheitsmanövers die zu diesem Zeitpunkt ausgeführte laterale Fahrfunktion bei gleichzeitiger Aktivierung einer Gate-Annäherungsfunktion (im Zustand „Gate approach“) oder einer Gate-Stillstandsfunktion (im Zustand „Gate hold“) aktiv. Bei der Gate-Stillstandsfunktion handelt es sich um eine einfach zu realisierende Aktivierung des Fahrzeugbremsystems bei Erreichen des Stillstands, die erst durch einen entsprechenden Befehl der Gate-Freigabe durch den Fahrer oder die Automation aufgehoben wird. Für die regelungstechnische Realisierung der Gate-Annäherungsfunktion, die als Ausgangsgröße eine Soll-Beschleunigung $a_{x, Gate}$ liefert, sind hingegen zunächst die Anforderungen an das Regelverhalten zu identifizieren, aus denen sich im nächsten Schritt geeignete Regelstrategien ableiten und entwickeln lassen. Neben der grundsätzlichen Funktion sind bei dem zu entwickelnden Regelverhalten für die Gate-Annäherungsfunktion die folgenden Anforderungen zu erfüllen:

Fahrerverhalten

Realisierung eines Verhaltens, das nach Möglichkeit dem in Abschnitt 2.3 als übertragbar identifizierten Fahrerverhalten an Entscheidungspunkten entspricht.

Komfort

Realisierung eines für den Fahrer als komfortabel empfundenen Regelverhaltens. Hierzu zählen insbesondere die auftretenden Längs- und Querschleunigungen. Fuchs¹³⁶ untersucht das Fahrerverhalten im Rahmen von Probandenversuchen im realen Straßenverkehr. Hierbei zeigt sich, dass das Fahrerverhalten unabhängig vom Fahrzeugtyp ist, der neben dem Fahrer und der Fahrbahn den größten potentiellen Einfluss auf den fahrdynamischen Leistungsbereich darstellt. Die von den Fahrern gewählte Längsbeschleunigung liegt in einem Bereich von etwa 1-2 m/s², die Längsverzögerung bei 2,5-4 m/s² und die Querschleunigung bei 3-4 m/s². Diese Werte werden im Folgenden als Komfortgrenzwerte herangezogen.

Konformität zur Straßenverkehrsordnung (StVO)

Die Straßenverkehrsordnung schreibt für die Annäherung an unterschiedliche Szenarien mit Entscheidungsbedarf¹³⁷ eine Annäherung mit nicht näher definierter „mäßiger Geschwindigkeit“ vor, die anderen Verkehrsteilnehmern eine Verhaltensprädiktion ermöglicht¹³⁸.

¹³⁶ Fuchs (1993): Beitrag zum Verhalten von Fahrer und Fahrzeug bei Kurvenfahrt, S. 59

¹³⁷ Annäherung an Kreuzungen (§ 8.2 StVO), Bahnübergänge (§ 19.1 StVO), Fußgängerüberwege (§26.1 StVO)

¹³⁸ Nach aktueller Rechtsprechung wird eine Geschwindigkeit als mäßig angesehen, wenn sie 30 m vor einem Fußgängerüberweg zwischen 20 bis maximal 30 km/h beträgt (OLG Hamm, VRS 51, S. 310).

Kooperation

Das Verhalten der Automation soll kooperativ im Sinne der Einbindung des menschlichen Fahrers in die Fahrzeugführung sein. Hierzu zählt, dass der Fahrer in der Lage ist, die von der Automation erhaltenen Informationen aufzunehmen, zu bewerten und gegebenenfalls eine Handlung abzuleiten, beziehungsweise in der Lage ist, unabhängig von der Automation eine Entscheidung treffen zu können.

Vollständigkeit

Realisierung eines auf alle Szenarien des CbW-Szenarienkatalogs anwendbaren und geeigneten Verhaltens.

Vorhersehbarkeit

Realisierung eines szenariounabhängigen, einheitlichen und somit für den Fahrer vorhersehbaren Verhaltens.

4.1.3 Entscheidungsmodell

Im Falle der Systemausprägungen „Vorschlag“ und „Entscheidung“ trifft die Automation auf Grundlage der durch die maschinelle Umfeldwahrnehmung detektierten Fahrzeugumgebung eine Entscheidung bezüglich des Verhaltens an dem nächsten Gate und macht dem Fahrer einen Vorschlag beziehungsweise führt die Entscheidung aus, solange der Fahrer nicht interveniert. Die Entscheidungsgrundlage bildet die Definition eines Sicherheitskorridors, den andere Verkehrsteilnehmer während der Manövertausführung beziehungsweise der Ausführung eines Manövertabschnitts zwischen zwei Gates durch das Ego-Fahrzeug nicht befahren dürfen. Der Sicherheitskorridor hängt dabei von dem für das jeweilige Manöver in der jeweiligen Szenerie zugewiesenen Informationsbedarf ab. Für das in Abbildung 4-2 dargestellte Beispiel einer Kreuzung entspricht der Sicherheitskorridor den vier Kreuzungsquadranten. Im Falle des Rechtsabbiegens umfasst der Sicherheitskorridor an Gate I,R zusätzlich den seitlichen Bereich zwischen Ego-Fahrzeug und rechtem Fahrbahnrand.

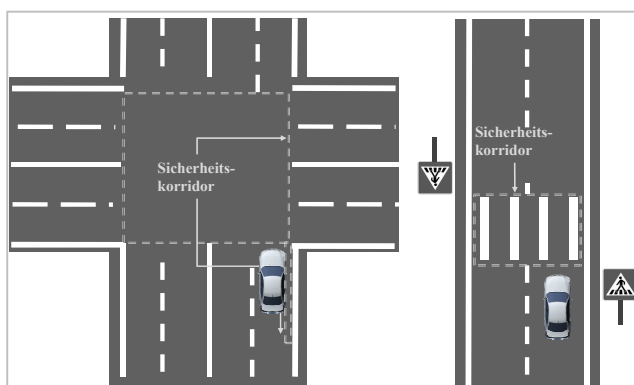


Abbildung 4-2: Sicherheitskorridor am Beispiel Kreuzung und Fußgängerüberweg

Für die sichere Manöverausführung wird ein auf der Time-to-safety-corridor (*TTS*) basierendes Sicherheitskriterium definiert. Die *TTS* kennzeichnet die Zeit, die bei konstanter Geschwindigkeit v_{Object} bis zur Einfahrt in den im Abstand $d_{S,\text{Object}}$ beginnenden Sicherheitskorridor benötigt wird. Die *TTS* der sich der Kreuzung nähernden Verkehrsteilnehmer muss dabei mindestens der für die Manöverausführung des Ego-Fahrzeugs erforderlichen Zeit entsprechen:

$$TTS = \frac{d_{S,\text{Object}}}{v_{\text{Object}}} \geq \Delta t_{ME} \quad (4.1)$$

Die Zeitdauer Δt_{ME} umfasst hierbei die Dauer, die für die Manöverdurchführung Δt_M , beispielsweise das Linksabbiegen an einer Kreuzung, und die Dauer Δt_D , die zur Detektion anderer Objekte durch die maschinelle Umfeldwahrnehmung erforderlich ist:

$$\Delta t_{ME} = \Delta t_M + \Delta t_D \quad (4.2)$$

4.2 Einfluss der Gate-Annäherungsfunktion auf das Zeitpotential

Dem vorherigen Abschnitt sind die zu erfüllenden Anforderungen an die Gate-Annäherungsfunktion zu entnehmen. Entsprechend dem von Conduct-by-Wire verfolgten Interaktionskonzept zwischen Fahrer und Automation stellt die Kooperation eine wesentliche Anforderung an die zu entwickelnde Gate-Annäherungsfunktion dar. Um den Fahrer in Kooperation mit der Automation in die Fahrzeugführung einzubinden, ist zu gewährleisten, dass der Fahrer die von der Automation erhaltenen Informationen aufnehmen und bewerten sowie gegebenenfalls eine Handlung ableiten kann beziehungsweise in der Lage ist, unabhängig von der Automation eine Entscheidung treffen zu können. Diese Möglichkeit wird direkt durch das Regelverhalten und das sich daraus ergebende Zeitpotential für die Entscheidungsfindung beeinflusst.

Im Sinne einer kooperativen Fahrzeugführung ist neben der vom Fahrer benötigten Entscheidungszeit auch der Zeitbedarf der Automation zu berücksichtigen. Dieser hängt wiederum von verschiedenen Parametern, wie beispielsweise der Konfiguration des Systems zur maschinellen Umfeldwahrnehmung oder den implementierten Entscheidungsalgorithmen ab. Unabhängig davon, ob die Entscheidung bezüglich der Gate-Passage durch den Fahrer oder die Automation getroffen wird, stellt der Fahrer das begrenzende Element während dem Entscheidungsprozess dar. Dies liegt zum einen an dem Zeitbedarf für die eigenständige Entscheidungsfindung und zum anderen an dem Zeitbedarf, um eine durch die Automation getroffene Entscheidung nachzuvollziehen. Aus diesem Grund liegt der Fokus im weiteren Verlauf auf der Betrachtung der Entscheidungszeit des menschlichen Fahrers.

Die Auswirkung einer für die Entscheidungsfindung nicht ausreichenden Zeitspanne lässt sich für die CbW-Automationsgrade betrachten. Im Falle der Systemausprägungen „Anzeige“ und „Vorschlag“ würde eine nicht ausreichende Zeitspanne dazu führen, dass die Gate-Steuerung das Gate-Annäherungsmanöver initiiert und das Fahrzeug am Gate zum Stehen kommt, da die Entscheidung des Fahrers ausbleibt. Dies hätte lediglich Auswirkungen auf den Fahrkomfort, da durch eine ausreichende Zeitspanne ein, vermutlich als lästig empfundenenes, Anhalten und Wiederauffahren des CbW-Fahrzeugs vermieden werden könnte. Im Falle des höchsten Automationsgrades, bei dem die Automation die Entscheidung über das Passieren des Gates trifft und den Fahrer über diese informiert, ist eine ausreichend lange Entscheidungszeit jedoch sicherheitsrelevant. Der Fahrer muss bei diesem Automationsgrad jederzeit die Möglichkeit haben, die Entscheidungen der Automation nachvollziehen und im Falle einer Fehlentscheidung der Automation gegebenenfalls korrigierend eingreifen zu können.

Um zu gewährleisten, dass dem Fahrer während der Annäherung an ein Gate ausreichend Zeit für die Entscheidungsfindung zur Verfügung steht, ist mindestens eine der folgenden Bedingungen zu erfüllen:

- Die Dauer, um die zwischen zwei Gates befindliche Wegstrecke zurückzulegen, muss in repräsentativen Szenarien mindestens der minimalen Entscheidungszeit des menschlichen Fahrers entsprechen: $\Delta t_G \stackrel{!}{\geq} \Delta t_{E,min}$
- Die Dauer des Gate-Annäherungsmanövers muss mindestens der minimalen Entscheidungszeit des menschlichen Fahrers entsprechen: $\Delta t_A \stackrel{!}{\geq} \Delta t_{E,min}$

Im Folgenden wird der Median von 2,0 s aus den von Olson und Farber verglichenen Studien¹³⁹ als minimal erforderliche Entscheidungszeit des menschlichen Fahrers $\Delta t_{E,min}$ herangezogen. Diese Überlegungen und die zuvor getroffenen Annahmen führen zu der folgenden Hypothese:

H 3 *Das Zeitpotential für die Entscheidungsfindung entspricht unabhängig von der Regelstrategie*

- während der zwischen zwei Gates zurückgelegten Wegstrecke
- während der Ausführung des Gate-Annäherungsmanövers

immer mindestens der minimalen Entscheidungszeit des menschlichen Fahrers von 2 s.

Die Untersuchung dieser Hypothese erfolgt in zwei Schritten. Zunächst werden die Einflussparameter auf die zur Verfügung stehende Entscheidungszeit zwischen zwei

¹³⁹ Vgl. Abschnitt 2.2.2

Gates identifiziert (Abschnitt 4.2.1) und Annahmen für die im zweiten Schritt durchgeführte analytische Betrachtung (Abschnitt 4.2.2) getroffen.

4.2.1 Identifikation der Einflussparameter auf das Zeitpotential

Während der Passage einer Sequenz von mehreren Gates haben folgende Parameter einen Einfluss auf das Zeitpotential für die Entscheidungsfindung:

- Gate-Sequenz
- Gate-Position
- Geschwindigkeitsprofil des CbW-Fahrzeugs
- Zeitpunkt der Gate-Freigabe

Diese Parameter und die für die weiterführende Betrachtung getroffenen Annahmen werden im Folgenden genauer beschrieben.

Gate-Sequenz

Wie in Abschnitt 3.2.2 gezeigt wird, ergeben sich für die verschiedenen repräsentativen Szenarien des CbW-Szenarienkatalogs unterschiedliche Gate-Sequenzen. In der weiteren Betrachtung wird jeweils nur die Folge zweier aufeinander folgender Gates als Ausschnitt einer möglichen Sequenz betrachtet. Durch die entsprechende Wahl der weiteren Einflussparameter vor Erreichen des ersten Gates, lassen sich somit alle möglichen Konstellationen einer Gate-Sequenz abbilden.

Gate-Position

Die Positionierung der Gates einer zu passierenden Sequenz hängt im Wesentlichen von der geometrischen Gestaltung der Szenerie und der geplanten Trajektorie zur Manöverbeführung ab. Die Richtlinien für die Anlage von Straßen geben diesbezüglich nur grobe Richtwerte für einzelne Szenerieklassen vor, wie beispielsweise die Fahrstreifenbreite oder zulässige Krümmungsradien von Kurven. Durch die Vielzahl möglicher Parameterkombinationen und die in der Realität auftretenden Besonderheiten ist eine Bestimmung typischer, in der Realität auftretender Gate-Positionen nicht möglich und in diesem Kontext auch nicht erforderlich. Das Ziel dieser Analyse besteht in der Untersuchung des Einflusses des Regelverhaltens auf das zur Verfügung stehende Zeitpotential für die Entscheidungsfindung. Der Abstand zwischen zwei Gates stellt dabei keine durch den zu entwickelnden Regler beeinflussbare Größe dar. In der weiteren Betrachtung wird der Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Gates, der aus der Positionierung dieser Gates resultiert, daher als freie Variable betrachtet.

Geschwindigkeitsprofil des CbW-Fahrzeugs

Ein weiterer Parameter, der einen direkten Einfluss auf die für die Entscheidungsfindung zur Verfügung stehende Zeit hat, ist das Geschwindigkeitsprofil des CbW-Fahrzeugs. Die Geschwindigkeit, mit der sich das Fahrzeug dem ersten Gate nähert, hängt primär von der durch den Fahrer gewählten Geschwindigkeit v_{set} ab. In der folgenden Analyse wird entsprechend der in den Diskursbereichen Stadt und Landstraße zulässigen Höchstgeschwindigkeit ein Geschwindigkeitsbereich von 30 km/h bis 120 km/h¹⁴⁰ betrachtet. Neben der Wunschgeschwindigkeit haben auch die Beschleunigung a_V und die durch die Gate-Annäherungsfunktion erzeugte Verzögerung des Fahrzeugs D_G einen Einfluss auf das Geschwindigkeitsprofil. Für die Untersuchung von Hypothese H 3 wird im Folgenden ein Worst-Case-Ansatz zu Grunde gelegt. Der angenommene Worst-Case-Regler zeichnet sich dadurch aus, dass die Geschwindigkeit mittels konstanter Beschleunigungsverläufe geregelt wird. Dieses Regelverhalten stellt hinsichtlich der zuvor beschriebenen Komfort-Anforderung keine bevorzugte Lösung für den zu entwickelnden Regler dar. Jedoch führt diese Regelstrategie zu der kürzesten Dauer, die erforderlich ist, um die Wegstrecke zwischen den beiden Gates im Falle einer ausbleibenden Entscheidung zurückzulegen. Andere Regelstrategien würden, bei gleichen Maximalwerten für Beschleunigung und Verzögerung, zu einem höheren Zeitpotential für die Entscheidungsfindung führen.

Zeitpunkt der Gate-Freigabe

Neben den zuvor genannten Einflussgrößen beeinflusst der Zeitpunkt, zu dem der Fahrer oder die Automation die Entscheidung treffen, das nächste Gate freizuschalten die Geschwindigkeit mit der das Fahrzeug das erste Gate passiert und den weiteren Geschwindigkeitsverlauf bis zum Stillstand an dem zweiten Gate. Dies hat somit direkten Einfluss auf die zur Verfügung stehende Zeit für die Entscheidung bezüglich der Fortsetzung der Manöverausführung am darauf folgenden Gate. Hierbei lassen sich drei Fälle unterscheiden, die für zwei aufeinander folgende Gates in Abbildung 4-3 exemplarisch für das zuvor beschriebene Worst-Case-Regelverhalten dargestellt sind. Die linken Diagramme zeigen den Geschwindigkeitsverlauf über der zurückgelegten Strecke. Durch Darstellung der Geschwindigkeit im Quadrat über der Wegstrecke, ergeben sich für konstante Beschleunigungen lineare Verläufe, bei denen die Steigung äquivalent zu der Beschleunigung ist. Die rechten Diagramme in dieser Abbildung zeigen die entsprechenden Geschwindigkeitsverläufe über der Zeit.

¹⁴⁰ Die untere Grenze entspricht der in Tempo-30-Zonen zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 30 km/h (§ 41.7 StVO). Die obere Grenze entspricht der zulässigen Höchstgeschwindigkeit außerhalb geschlossener Ortschaften von 100 km/h (§ 3.2.c StVO) zuzüglich eines Toleranzbereichs von 20%.

In Fall 1 wird das erste Gate freigeschaltet, bevor das Gate-Annäherungsmanöver für das erste Gate initiiert wird. Die Geschwindigkeit bei der Passage des ersten Gates v_{GE} hängt von der vom Fahrer gewählten Geschwindigkeit v_{set} ab. Zudem wird v_{GE} automatisch auf die maximale Geschwindigkeit $v_{GE,max}$ in Abhängigkeit des Abstands zwischen den beiden Gates s_G und der dem zweiten Gate zugewiesenen Verzögerung D_{G2} limitiert. Demnach kann die Verzögerung für die Annäherung an das zweite Gate, bevor (Fall 1.a) oder nachdem (Fall 1.c) das erste Gate passiert wurde, beziehungsweise am ersten Gate (Fall 1.b) einsetzen.

In Fall 2 wird das erste Gate freigeschaltet, nachdem das Fahrzeug an diesem Gate zum Stehen gekommen ist. Die Geschwindigkeit v_{BG} , bis zu der die Automation zwischen den beiden Gates beschleunigen wird, hängt von der gewählten Geschwindigkeit v_{set} ab. Zudem ist diese Geschwindigkeit auf $v_{BG,max}$ limitiert, was wiederum von s_G , D_{G2} und der Beschleunigung des Fahrzeugs a_V abhängt.

In Fall 3 ist v_{GE} niedriger als v_{set} , was der Fall sein kann, wenn die Entscheidung das erste Gate zu passieren erst erfolgt, nachdem die Verzögerung für das erste Gate bereits eingesetzt hat oder wenn der Abstand zu dem Gate zu kurz ist, um entweder v_{set} oder $v_{GE,max}$ zu erreichen. Demnach stellen Fall 1 und Fall 2 die Extremfälle von Fall 3 dar. Die zwischen den beiden Gates zur Verfügung stehende Zeit hängt primär von der Geschwindigkeit am ersten Gate v_{GE} ab. Die Fälle, in denen die Beschleunigung und der Abstand zum Gate ausreichen, um v_{set} oder $v_{GE,max}$ zu erreichen, sind identisch zu Fall 1. Falls $0 < v_{GE} \leq v_{GE,max}$ gilt, hängt v_{BG} von v_{set} ab und ist auf $v_{BG,max}$ begrenzt, welche wiederum von s_G , D_G , a_V und v_{GE} abhängt.

Der sich daraus ergebene Einfluss auf die zwischen den beiden Gates und während der Verzögerungsphase zur Verfügung stehende Zeit ist für die einzelnen Fälle in den rechten Diagrammen von Abbildung 4-3 dargestellt.

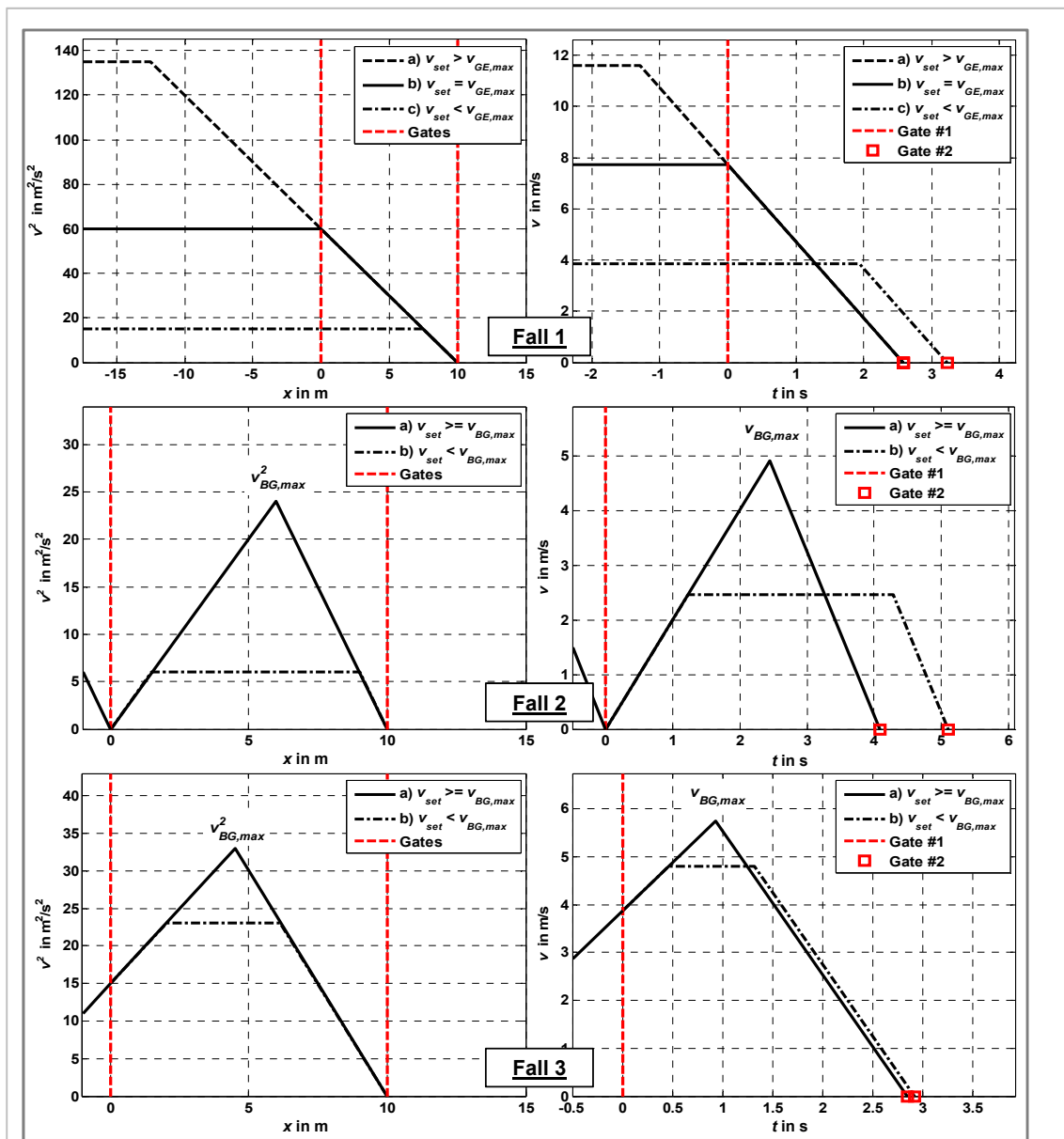


Abbildung 4-3: Fallunterscheidung für den Zeitpunkt der Gate-Freigabe¹⁴¹

Diese Fallunterscheidung zeigt, wie das Verhalten während der Annäherung an das erste Gate die für die Entscheidungsfindung bezüglich dem zweiten Gate zur Verfügung stehende Zeit beeinflusst.

¹⁴¹ Nach Geyer (2013): Maneuver-based vehicle guidance based on the Conduct-by-Wire principle

4.2.2 Analytische Betrachtung

Zeitpotential zwischen zwei Gates

Für die im vorherigen Abschnitt unterschiedenen Fälle des Zeitpunkts der Gate-Freigabe, lässt sich für das beschriebene Regelverhalten eine Worst-Case-Abschätzung für die zwischen den beiden Gates zur Verfügung stehende Zeit machen. Für die Annahme konstanter Beschleunigungen ergeben sich für die drei in Abbildung 4-3 dargestellten Fälle die Formeln (4.3) bis (4.5).

$$\Delta t_{G,1} = \frac{s_G}{v_{GE}} + \frac{v_{GE}}{2D_G} \text{ mit } 0 < v_{GE} \leq v_{GE,max} = \sqrt{2D_G s_G} \quad (4.3)$$

$$\Delta t_{G,2} = v_{BG} \left(\frac{1}{2a_V} + \frac{1}{2D_G} + \frac{s_G}{v_{BG}^2} \right) \text{ mit } 0 < v_{BG} \leq v_{BG,max} = \sqrt{\frac{2s_G a_V D_G}{D_G + a_V}} \quad (4.4)$$

$$\Delta t_{G,3} = \frac{v_{BG} - 2v_{GE}}{2a_V} + \frac{v_{BG}}{2D_G} + \frac{s_G}{v_{BG}} + \frac{v_{GE}^2}{2a_V v_{BG}}$$

$$\text{mit } 0 < v_{GE} < v_{set} \cap 0 < v_{GE} < v_{GE,max} = \sqrt{2D_G s_G} \quad (4.5)$$

$$\text{mit } v_{GE} < v_{BG} \leq v_{BG,max} = \sqrt{\frac{2a_V D_G \left(s_G + \frac{v_{GE}^2}{2a_V} \right)}{D_G + a_V}}$$

Anhand dieser Gleichungen lässt sich das minimale Zeitpotential $\Delta t_{G,min}$ zwischen zwei Gates für die drei Fälle bestimmen. Abbildung 4-4 zeigt die Verläufe in Abhängigkeit des Gate-Abstands s_G für die drei Verzögerungen $D_G = 3, 5$ und 10 m/s^2 . Gemäß den Gleichungen (4.3)-(4.5) nimmt das Zeitpotential in allen drei Fällen mit dem Gate-Abstand zu und mit der Verzögerung ab. Diese Betrachtung zeigt, dass die Forderung, nach der die Dauer, um die zwischen zwei Gates befindliche Wegstrecke zurückzulegen, mindesten der Entscheidungszeit des Menschen von zwei Sekunden entsprechen muss, für einige Parametervariationen nicht erfüllt ist. Insgesamt lässt sich eine untere Grenze für den Gate-Abstand definieren, die für die drei exemplarischen Verzögerungen bei 6, 10 und 18 m liegt. Durch die Abhängigkeit der maximalen Geschwindigkeit zwischen den beiden Gates von dem Gate-Abstand lassen sich somit die Grenzggeschwindigkeiten ableiten, ab denen die Bedingung $\Delta t_G \geq 2 \text{ s}$ nicht erfüllt ist. Für $D_G = 3 \text{ m/s}^2$ ergibt sich somit, dass Gate-Abstände unter 6 m und vom Fahrer gewählte Geschwindigkeiten über 8 m/s (28,8 km/h) zu zeitkritischen Gate-Passagen führen können.

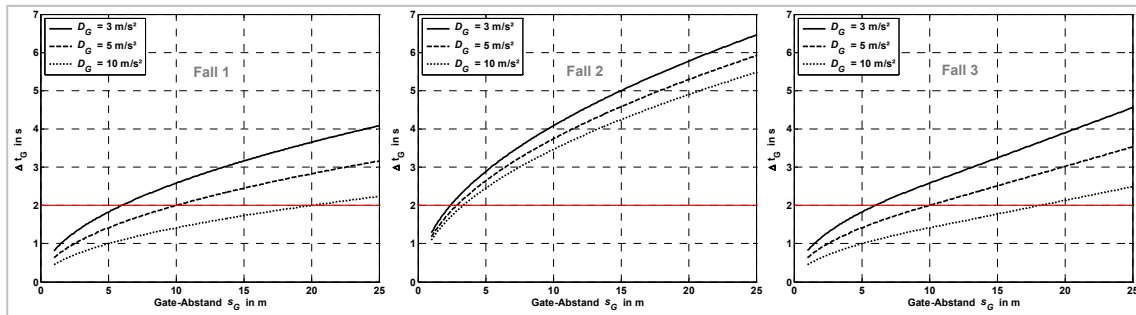


Abbildung 4-4: Minimales Zeitpotential zwischen zwei Gates in Abhängigkeit des Gate-Abstands s_G und für unterschiedliche Verzögerungen D_G ¹⁴²

Zeitpotential während der Ausführung des Gate-Annäherungsmanövers

Die Bestimmung des minimalen Zeitpotentials während der Ausführung des Gate-Annäherungsmanövers $\Delta t_{A,\min}$ erfolgt für die Betrachtung einer Reduktion der maximalen Geschwindigkeit zwischen den beiden Gates $v_{BG,\max}$ mit konstanter Verzögerung:

$$\Delta t_A = \frac{v_{BG,\max}}{D_G} \quad (4.6)$$

Hieraus lässt sich wiederum die untere Grenzggeschwindigkeit ableiten, ab der die Bedingung a nicht mehr erfüllt ist. Diese liegen für die drei zuvor betrachteten exemplarischen Verzögerungen bei 6, 10 und 20 m/s (22, 36 und 72 km/h). Geschwindigkeiten unterhalb dieser identifizierten Grenzggeschwindigkeiten können demnach zu zeitkritischen Gate-Passagen führen.

4.2.3 Zwischenfazit und Diskussion

Wie die vorangegangene Betrachtung zeigt, existieren Parameterkombinationen, in denen die Zeit zwischen zwei Gates und während der Ausführung des Gate-Annäherungsmanövers kleiner ist als die mit 2 s angenommene mindestens erforderliche Entscheidungszeit des menschlichen Fahrers, womit **Hypothese 3 zunächst falsifiziert ist**. Dies kann dazu führen, dass eine sichere Manöverausrührung in diesen Szenarien nicht gewährleistet ist. Aus diesem Ergebnis lässt sich ableiten, dass eine Regelstrategie zu entwickeln ist, die zusätzlich zu den in Abschnitt 4.1.2 formulierten Anforderungen gewährleistet, dass die minimale Entscheidungszeit zwischen zwei Gates für die Entscheidungsfindung zur Verfügung steht. Im folgenden Abschnitt werden hierfür geeignete Regelstrategien identifiziert und bewertet.

¹⁴² Angenommene Beschleunigung $a_v = 2 \text{ m/s}^2$

4.3 Regelstrategien für die Gate-Annäherungsfunktion

4.3.1 Identifikation möglicher Regelstrategien

Die in den vorherigen Abschnitten aufgeführten und weiter verfeinerten Anforderungen führen zu teils gegensätzlichen Regelzielen. Dies gilt insbesondere für den Zeitpunkt der einsetzenden Verzögerung. Gemäß der Konformität zur Straßenverkehrsordnung und der Einhaltung von Komfortgrenzen ist eine rechtzeitige Verzögerung vor dem Gate anzustreben. Andererseits ergibt sich aus der Betrachtung der Vollständigkeit und der damit verbundenen Bewertung der Eignung dieser Strategie für alle Szenarien des CbW-Szenarienkatalogs sowie dem Vergleich mit dem menschlichen Fahrerverhalten an Entscheidungspunkten, dass eine zu frühe Verzögerung nicht in allen Fällen anzustreben ist. Dies gilt beispielsweise bei der Annäherung an eine Lichtsignalanlage mit grüner Signalisierung. Im Falle einer zu frühen Verzögerung, möglicherweise zu einem Zeitpunkt, zu dem der Fahrer oder die Automation, beispielsweise aufgrund von Sichtverdeckung, keine Entscheidung bezüglich der Weiterfahrt an dem der Lichtsignalanlage zugewiesenen Gate treffen können, besteht die Möglichkeit, dass das Lichtsignal auf Rot wechselt. Dieses Annäherungsverhalten führt demnach zu einer aus Fahrersicht vermeidbaren Unterbrechung der Manöverausrührung. Während es sich in dem beschriebenen Szenario in erster Linie um eine Komfortbeeinträchtigung handelt, so kann eine zu frühe Verzögerung zu einer riskanten Fahrsituation, beispielsweise beim Kreuzen von Trajektorien entgegenkommender und vorfahrtsberechtigter Verkehrsteilnehmer beim Linksabbiegen an einer Kreuzung, führen. Je früher die Verzögerung, beispielsweise auf das einem nach der Kreuzungsausfahrt positioniertem Fußgängerüberweg zugewiesene Gate, einsetzt, desto länger ist die Aufenthaltsdauer in dem Sicherheitskorridor.

Abbildung 4-5 zeigt qualitativ mögliche Regelstrategien zur Geschwindigkeitsreduktion bei der Ausführung des Annäherungsmanövers an ein geschlossenes Gate, die im Folgenden beschrieben und deren Eignung basierend auf den zuvor definierten Anforderungen bewertet wird. Hinsichtlich der Anforderung „Kooperation“ wird bewertet, ob mit der jeweiligen Regelstrategie eines der beiden Regelziele $\Delta t_G \geq \Delta t_{E,min}$ oder $\Delta t_A \geq \Delta t_{E,min}$ für alle Szenarien realisiert werden kann. Diese Bewertung erfolgt getrennt für die beiden Regelziele, da eine Regelstrategie, die szenarioabhängig das eine oder das andere Regelziel erfüllt, zu einer direkten Verletzung der Anforderung „Vorhersehbarkeit“ führt.

Bei den ersten fünf Strategien handelt es sich um Regler mit fester Parametrierung. Die adaptive Strategie besteht in einer variablen, szenarioabhängigen Parametrierung des Reglers.

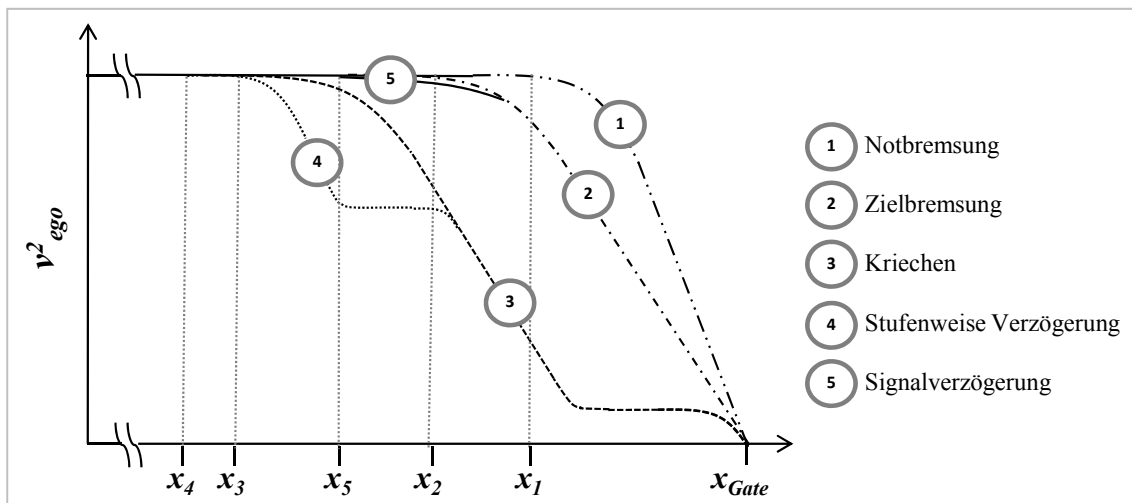


Abbildung 4-5: Qualitative Darstellung möglicher Gate-Annäherungsstrategien als Quadrat der Geschwindigkeit über dem Weg. Die Wegkoordinate x_i kennzeichnet die Initiierung des Gate-Annäherungsmanövers bezogen auf die Gate-Position x_{Gate}

Notbremsung

Bei dieser Regelstrategie wird das Gate-Annäherungsmanöver zum letztmöglichen Zeitpunkt mit der in der aktuellen Fahrsituation maximal möglichen Verzögerung initiiert. Der Vorteil dieser Strategie liegt in der spätestmöglichen Unterbrechung der Manöverausführung und der, wie bei allen Strategien mit fester Reglerparametrierung, guten Vorhersehbarkeit für den Fahrer aufgrund eines in allen Szenarien identischen Regelverhaltens. Allerdings wird eine Reihe von Anforderungen nicht erfüllt. Hierzu zählt die von der StVO geforderte rechtzeitige Verzögerung zur Gewährleistung einer guten Vorhersehbarkeit des Verhaltens des CbW-Fahrzeugs für andere Verkehrsteilnehmer. Zudem entspricht dieses Verhalten nicht dem eines menschlichen Fahrers innerhalb der als komfortabel empfundenen Grenzen. Zuletzt ist die Erfüllung der beiden Regelziele $\Delta t_G \geq \Delta t_{E,min}$ oder $\Delta t_A \geq \Delta t_{E,min}$, wie den Ergebnissen aus Abschnitt 4.2.2 zu entnehmen ist, aufgrund der festen Parametrierung nicht darstellbar.

Zielbremsung

Das Ziel dieser Strategie ist die Ausführung einer Zielbremsung mit einer als noch komfortabel empfundenen Verzögerung, wodurch sich die positive Bewertung im Vergleich zur Notbremsung bezogen auf Fahrerverhalten und Komfort ergibt. Ebenso erfolgt der Verzögerungsbeginn früher und daher im Sinne der StVO vorhersehbarer als bei einer Verzögerung zum letztmöglichen Zeitpunkt. Die Erfüllung des Regelziels $\Delta t_G \geq \Delta t_{E,min}$ ist gemäß den Ergebnissen aus Abschnitt 4.2.2 nicht darstellbar. Die Anforderung $\Delta t_A \geq \Delta t_{E,min}$ lässt sich einzig durch eine Auslegung auf einen zu definierenden Grenzfall erfüllen. Beispielsweise ließe sich mit $D_G = 1,5 \text{ m/s}^2$ ein Geschwindigkeitsbe-

reich bis zu 3 m/s abdecken¹⁴³, innerhalb dem die Anforderung erfüllt ist. Diese Parametrierung führt jedoch bei Annäherungen aus höheren Geschwindigkeiten zu einer für die Entscheidungsfindung deutlich zu frühen Aktivierung des Gate-Annäherungsmanövers in einer Phase, in der meist noch keine Entscheidung getroffen werden kann. Die Anforderung wird daher als nicht erfüllt bewertet.

Kriechen

Gemäß dieser Regelstrategie wird das Fahrzeug zunächst auf eine niedrige Geschwindigkeit, beispielsweise die Schrittgeschwindigkeit¹⁴³ verzögert. Anschließend kriecht das Fahrzeug bei dieser Geschwindigkeit bis zum Gate, gefolgt von dem Stillstand am Gate. Diese Strategie lässt sich beispielsweise durch Kombination der Zielbremsung mit einer Kriechphase realisieren. Dieses Verhalten entspricht dem von der StVO geforderten Verhalten des langsamen Hineintastens in unübersichtlichen Szenarien¹⁴⁴. Die Erfüllung des Regelziels $\Delta t_G \geq \Delta t_{E,\min}$ ist auch bei dieser Strategie nur durch Auslegung auf den Grenzfall, beispielsweise durch Wahl einer Kriechgeschwindigkeit für geringe Gate-Abstände möglich, was zu den zuvor beschriebenen Nachteilen führt. Die Anforderung $\Delta t_A \geq \Delta t_{E,\min}$ lässt sich hingegen durch geeignete Parametrierung der Verzögerung D_G und der Dauer der Kriechphase erfüllen. Jedoch ist diese Strategie, aufgrund der frühen Geschwindigkeitsreduktion nicht für die beschriebenen Szenarien geeignet, in denen eine möglichst späte Verzögerung erfolgen soll.

Stufenweise Verzögerung

Diese Strategie verzögert das Fahrzeug in mehreren Verzögerungsstufen. Dieses Regelverhalten entspricht nicht dem beobachtbaren Verhalten des menschlichen Fahrers und wird, je nach Verzögerung und Anzahl der Stufen, eher störend als komfortabel bewertet werden. Ebenso ist diese Strategie nicht für alle Szenarien geeignet und widerspricht der Regelung nach der StVO¹⁴⁵.

Signalverzögerung

Diese Strategie entspricht der vorherigen Strategie einer stufenweisen Verzögerung, wobei es sich um zwei Stufen mit unterschiedlichen Verzögerungen handelt. Durch eine erste, leichte Verzögerung wird dem Fahrer der Beginn des Gate-Annäherungsmanövers

¹⁴³ Nach aktueller Rechtsprechung entspricht die Schrittgeschwindigkeit einer Geschwindigkeit von bis zu 10 km/h (OLG Hamm, VRS 6, S. 222). Es wird angenommen, dass dem menschlichen Fahrer eine Differenzierung des Anhaltevorgangs unterhalb dieser Geschwindigkeit nicht möglich ist. Somit ist auch eine Gewährleistung der Entscheidungszeit von 2 s nicht erforderlich.

¹⁴⁴ StVO §8.2: “[...]Kann er dies nicht übersehen, weil die Straßenstelle unübersichtlich ist, so darf er sich vorsichtig in die Kreuzung oder Einmündung hineintasten, bis er die Übersicht hat. [...]”

¹⁴⁵ StVO § 3.2: „Ohne triftigen Grund dürfen Kraftfahrzeuge nicht so langsam fahren, dass sie den Verkehrsfluss behindern.“

signalisiert. Durch die leichte Verzögerung wird die Ausführung des aktuellen Manövers zunächst nur wenig gestört. Dies ermöglicht dem Fahrer, die Fortsetzung des Manövers ohne eine störende Unterbrechung zu beauftragen. Die zweite Verzögerungsstufe entspricht einer Zielbremsung zum Abbau der verbleibenden Geschwindigkeit bei einer vorgegebenen Verzögerung. Bei diesem Verhalten handelt es sich um ein typisches, beobachtbares Fahrerverhalten bei der Annäherung an Entscheidungspunkte¹⁴⁶. Durch entsprechende Parametrierung der Verzögerungsstufen lässt sich das Regelziel $\Delta t_A \geq \Delta t_{E,\min}$ darstellen. Ebenso ist diese Strategie für alle Szenarien geeignet.

Adaptive Regelstrategie

Die adaptive Regelstrategie steht stellvertretend für die Gesamtheit aller zuvor betrachteten Strategien mit einer variablen, szenarioabhängigen Reglerparametrierung. Der Vorteil liegt in der Möglichkeit, theoretisch beide Regelziele $\Delta t_G \geq \Delta t_{E,\min}$ und $\Delta t_A \geq \Delta t_{E,\min}$ in allen Szenarien realisieren zu können. Abbildung 4-6 zeigt exemplarisch die Ausführung einer Zielbremsung bei Annäherung an ein Gate mit einer variablen Reglerparametrierung. In diesem Beispiel handelt es sich um eine Annäherung, bei der das erste Gate mit einer konstanten Geschwindigkeit von 34 km/h passiert wird (Zeitpunkt der Gate-Freigabe Fall 1) und sich das zweite Gate in einem Abstand von 9,2 m befindet. Durch Aktivierung eines Gate-Annäherungsmanövers mit einer Verzögerung $D_G = 5 \text{ m/s}^2$ kommt das Fahrzeug nach 1,8 s an dem zweiten Gate zum Stehen. Dieses Regelverhalten verletzt somit beide Regelziele. Durch eine Reduktion der Eintrittsgeschwindigkeit an dem ersten Gate v_{GE} auf 25 km/h wird das Regelziel von 2 s bei gleicher Verzögerung D_G exakt erfüllt. Die adaptive Regelstrategie bietet zudem die Möglichkeit, den Ort des im Vergleich zur Ausgangsstrategie generierten Zeitpotentials und bezogen auf die Gate-Position, zu beeinflussen. So führt eine leichte Reduktion von D_G auf 4,6 m/s² und von v_{GE} auf 33 km/h zu dem gleichen Zeitpotential. Jedoch wird die zusätzliche Zeit gezielt in der späten und für die Entscheidungsfindung, aufgrund der unter Umständen besseren Informationslage, nützlicheren Annäherungsphase erzeugt.

¹⁴⁶ Vgl. Ergebnisse zur Fahrerverhaltensbeobachtung an Entscheidungspunkten in Abschnitt 2.2.3

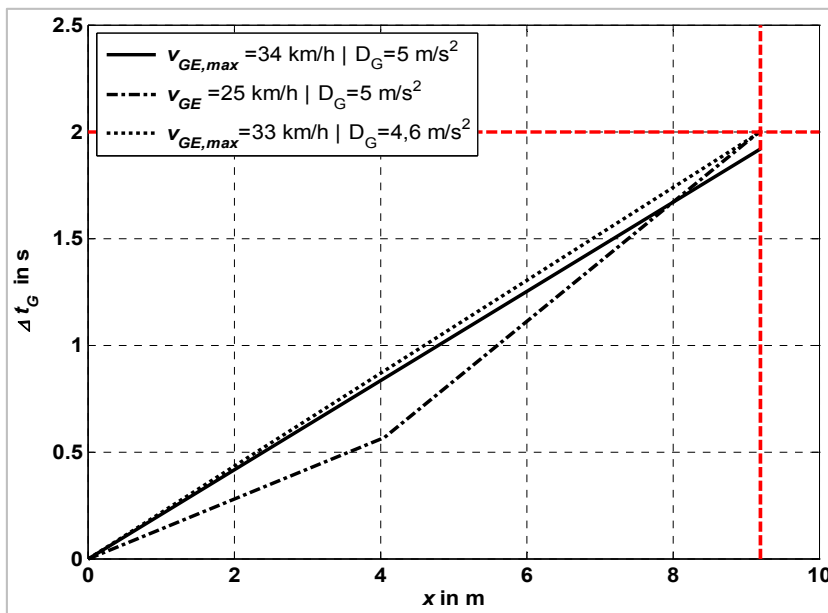


Abbildung 4-6: Beispiel einer adaptiven Gate-Annäherungsstrategie (Anpassung von Geschwindigkeit und Verzögerung) im Vergleich zu einer Zielbremsung mit konstanter Verzögerung aus unterschiedlichen Geschwindigkeiten

Der Nachteil einer adaptiven Regelstrategie liegt in der prinzipbedingten schlechten Vorhersehbarkeit des Verhaltens für den Fahrer, da sich die Automation in jedem Szenario unterschiedlich verhalten kann. Ebenso existieren aufgrund der Vielzahl an beeinflussbaren Parametern¹⁴⁷ nicht immer eindeutige Lösungen, wodurch die Gefahr nahezu beliebiger Funktionen in Verbindung mit einer schlechten Vorhersehbarkeit für den Fahrer besteht. Zudem stellt eine adaptive Regelstrategie zusätzliche Anforderungen an den Vorausschauhorizont¹⁴⁸ und somit an die maschinelle Umfeldwahrnehmung, da nicht nur Informationen über den Streckenverlauf bis zu dem nächsten, sondern für die nächsten beiden Gates erforderlich sind.

Tabelle 4-1 fasst die Bewertung der möglichen Annäherungsstrategien basierend auf den zu erfüllenden Anforderungen zusammen.

¹⁴⁷ Im Fall 3 des Zeitpunkts der Gate-Freigabe können zur Optimierung des Zeitpotentials zwischen zwei Gates beispielsweise die vier Parameter v_{GE} , v_{BG} , D_G und a_v verändert werden.

¹⁴⁸ Vgl. Kapitel 5

Tabelle 4-1: Bewertung möglicher Annäherungsstrategien

	Fahrerverhalten	Komfort	Kooperation		StVO	Vollständigkeit	Vorhersehbarkeit
			$\Delta t_G \geq \Delta t_{E,min}$	$\Delta t_A \geq \Delta t_{E,min}$			
Notbremsung	-	-	-	-	-	+	+
Zielbremsung	+	+	-	-	+	+	+
Kriechen	+	+	-	+	+	-	+
Stufen	-	(+)	-	+	(+)	-	+
Signal	+	+	-	+	+	+	+
Adaptiv	(+)	+	+	+	+	+	-

Dieser Bewertung ist zu entnehmen, dass einzig die Strategie „Signalverzögerung“ nahezu alle Anforderungen erfüllt. Die Ausnahme bildet das Regelziel $\Delta t_G \geq \Delta t_{E,min}$, welches nur durch die adaptive Regelstrategie realisierbar ist. Aufgrund der beschriebenen Nachteile der adaptiven Regelstrategie wird im Folgenden die Signalverzögerung weiter konkretisiert.

4.3.2 Entwicklung der Regelstrategie „Signalverzögerung“

Reglerauslegung

Die präferierte Regelstrategie für das Gate-Annäherungsmanöver stellt gemäß der vorherigen Betrachtung die Regelstrategie „Signalverzögerung“, die einer zweistufigen Verzögerung mit fester Parametrierung entspricht, dar. Auf die erste Phase der Signalverzögerung mit einer konstanten Verzögerung D_1 und einer Verzögerungsdauer Δt_{A1} folgt die zweite Phase der Zielbremsung mit einer konstanten Verzögerung D_2 und einer Verzögerungsdauer Δt_{A2} . Zur Erfüllung des Regelziels, dass die Gesamtdauer des Gate-Annäherungsmanövers mindestens der minimal erforderlichen Entscheidungszeit des menschlichen Fahrers entspricht, sind die vier Variablen D_1 , D_2 , Δt_{A1} und Δt_{A2} der beiden Verzögerungsphasen entsprechend zu parametrieren:

$$\Delta t_A = \Delta t_{A1} + \Delta t_{A2} = \frac{v_{A1} - v_{A2}}{D_1} + \frac{v_{A2}}{D_2} \geq \Delta t_{E,min} \quad (4.7)$$

Hierbei existieren die in Tabelle 4-2 aufgeführten möglichen Reglerauslegungen.

Tabelle 4-2: Mögliche Reglerauslegungen für die Strategie „Signalverzögerung“

Reglerauslegung	Bewertung
Beginn der ersten Verzögerungsphase D_1 zum Zeitpunkt $t_{A1} = t_{G2} - \Delta t_{E,\min}$	+ Vorhersehbarkeit (Auslösung bei immer gleicher TTG ¹⁴⁹) – Nur für Annäherungsgeschwindigkeiten mit $\Delta t_A \leq \Delta t_{E,\min}$ realisierbar
Zeitvorgabe für Δt_{A1}	+ Vorhersehbarkeit (Dauer der ersten Phase konstant) + Keine „künstliche“ Verlängerung der Phase D_2 . – Auslösung bei unterschiedlichen TTG – Minimalgeschwindigkeit in Abhängigkeit von Δt_{A1} .
Mindestzeitvorgabe für Δt_{A1}	– Vorhersehbarkeit (Dauer der ersten Phase variabel) – Auslösung bei unterschiedlichen TTG – Unter Umständen lange Phase D_1 .
Zeitvorgabe für Δt_{A2}	– Niedrige Geschwindigkeiten: kurze Phase D_1 und unnötig lange Phase D_2 . – Höhere Geschwindigkeiten: sehr lange Phase D_1 und kurze Phase D_2 . – Auslösung bei unterschiedlichen TTG
Zeitvorgabe für Δt_A	– Nur für eine Geschwindigkeits-Verzögerungs-Kombination realisierbar.

Die Bewertung in Tabelle 4-2 zeigt die Vor- und Nachteile der verschiedenen Reglerauslegungen. Bei den meisten Auslegungen ist die Erfüllung des Regelziels $\Delta t_A \geq \Delta t_{E,\min}$ nur für einen begrenzten Parameterbereich möglich oder es überwiegen die Nachteile hinsichtlich einer praktischen Realisierung und der Akzeptanz durch den menschlichen Fahrer, wie beispielsweise eine lange erste Verzögerungsphase D_1 und eine damit verbundene frühe Initiierung des Gate-Annäherungsmanövers. Die gemäß dieser Bewertung beste Lösung, um das Regelziel $\Delta t_A \geq \Delta t_{E,\min}$ mit der Regelstrategie „Signalverzögerung“ und einer festen Parametrierung zu erfüllen, stellt die Zeitvorgabe für die erste Verzögerungsphase D_1 dar. Die Vorteile bestehen in der guten Vorhersehbarkeit für den menschlichen Fahrer, da die Dauer Δt_{A1} prinzipbedingt in allen Szenarien identisch ist, wodurch der Nachteil einer Auslösung bei unterschiedlichen TTG aufgehoben wird. Zudem ist die Dauer Δt_{A2} auf die für eine Zielbremsung aus der zu Beginn der zweiten Verzögerungsphase vorliegenden Geschwindigkeit v_{A2} erforderliche Dauer begrenzt. Eine zeitliche Verlängerung dieser die Manöverausführung, aufgrund der höheren Verzögerung stärker beeinflussenden und somit durch den Fahrer als störender empfundenen, Phase, wie beispielsweise durch eine Zeitvorgabe für Δt_{A2} , erfolgt nicht. Ein möglicher Nachteil besteht in der zu erfüllenden Minimalgeschwindigkeit zu

¹⁴⁹ Time-to-Gate: Dauer bis zum Erreichen der Gate-Position in Abhängigkeit des Abstands zum Gate d_{Gate} und der Geschwindigkeit v_{ego} des Ego-Fahrzeugs: $TTG = d_{Gate} / v_{ego}$.

Beginn der zweiten Phase D_2 , um das Regelziel $\Delta t_A \geq \Delta t_{E,\min}$ in Abhängigkeit der Dauer Δt_{A1} und der Verzögerung D_2 zu erfüllen.

Reglerstruktur

Die prototypische Realisierung des Reglers zur Ausführung des Gate-Annäherungsmanövers erfolgt in der Simulationsumgebung IPG CarMaker unter Nutzung der Matlab/Simulink-Schnittstelle. Die Umsetzung der Regelstrategie „Signalverzögerung“ mit einer festen Parametrierung und einer Vorgabe für die Dauer der ersten Verzögerungsphase Δt_{A1} erfolgt mit der in Abbildung 4-7 dargestellten Reglerstruktur. In dem Block „Required stopping distance“ wird der für die aktuelle Geschwindigkeit und die Parametrierung von D_1 , D_2 und Δt_{A1} erforderliche Anhalteweg gemäß

$$s_A = s_{A1} + s_{A2} = \frac{v_{A1}^2 - v_{A2}^2}{2D_1} + \frac{v_{A2}^2}{2D_2} \quad (4.8)$$

berechnet und mit dem aktuellen Abstand des CbW-Fahrzeugs zum nächsten Gate d_{Gate} verglichen. Dieser Block liefert zu jedem Rechenschritt eine Information, ob die Bedingung $s_A \leq d_{Gate}$ erfüllt ist.

In dem zweiten Block „Required deceleration“ wird die in jedem Rechenschritt erforderliche konstante Verzögerung D_{req} gemäß

$$D_{req} = \frac{v_{ego}^2}{2 \cdot (d_{Gate} - v_{ego} \cdot \tau)} \quad (4.9)$$

berechnet, um aus der Geschwindigkeit v_{ego} und unter Berücksichtigung eines Zeitfaktors τ zur Kompensation des Zeitverzugs zwischen Aktivierung des Bremssystems und einsetzender Verzögerung an dem im der Entfernung d_{Gate} befindlichen Gate zum Stehen zu kommen.

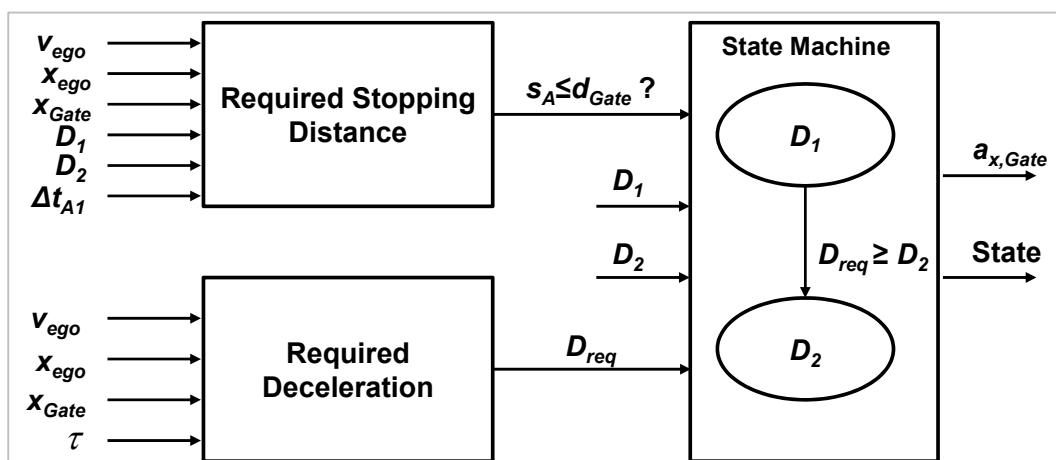


Abbildung 4-7: Reglerstruktur „Signalverzögerung“

Die Aktivierung der jeweiligen Verzögerungsstufe erfolgt über einen Zustandsautomaten. Die Eingangsgrößen dieses Zustandsautomaten stellen die Ausgangsgrößen der beiden zuvor beschriebenen Blöcke sowie die Werte für die Verzögerungen D_1 und D_2 dar.

Sobald die Bedingung $s_A \leq d_{\text{Gate}}$ erfüllt ist, erfolgt die Initiierung des Gate-Annäherungsmanövers mit der ersten Verzögerungsstufe D_1 . Diese Bedingung stellt somit zeitgleich die Übergangsbedingung „activate“ für die automatische Transition in den Zustand „Gate active“ des in Abbildung 4-1 dargestellten Zustandsautomaten der Gate-Steuerung dar, welcher zu einer Unterbrechung des aktuell ausgeführten Manövers führt. Der Übergang in den zweiten Zustand, in dem die Verzögerungsstufe D_2 aktiviert wird, erfolgt, sobald die Bedingung $D_{\text{req}} \geq D_2$ erfüllt ist. Dieser Zustandsübergang kann sequentiell bezogen auf D_1 während der Annäherung an das Gate erfolgen. Dieser Zustand kann jedoch im Falle einer späten Aktivierung des Gates auch direkt erreicht werden, sobald die für die Zielbremsung erforderliche Verzögerung den Wert von D_2 übersteigt. Die Ausgangsgrößen des Zustandsautomaten sind die Beschleunigung und die aktivierte Verzögerungsstufe.

Parametrierung

Die Grundlage der in Tabelle 4-3 dargestellten Parametrierung der Gate-Annäherungsfunktion bildet die Übertragung des menschlichen Fahrerverhaltens an Entscheidungspunkten. So wird für die erste Stufe eine Verzögerung von $D_1 = 1 \text{ m/s}^2$ gewählt. Dies entspricht in etwa der durch die Fahrwiderstände und Motorschleppmoment hervorgerufenen Verzögerung beim Ausrollen im eingekuppelten Zustand des Getriebes¹⁵⁰. Diese Verzögerung stellt eine geringe, aber dennoch für den Fahrer spürbare Unterbrechung der Ausführung des aktuellen Fahrmanövers dar, was dem Konzept der Signalverzögerung entspricht. Für die zweite Stufe wird eine Verzögerung von $D_2 = 3 \text{ m/s}^2$ gewählt. Dies entspricht der Auslegung heutiger ACC-Systeme¹⁵¹ und einer durch den menschlichen Fahrer noch als komfortabel empfundenen Verzögerung¹⁵². Die Dauer der ersten Verzögerungsstufe Δt_{A1} entspricht mit 1 s der Hälfte der minimal erforderlichen Entscheidungszeit des menschlichen Fahrers $\Delta t_{E,\text{min}}$.

¹⁵⁰ Dies bestätigen Messungen für unterschiedliche Fahrzeugtypen von Cliff et al. (1998): The Measured Rolling Resistance of Vehicles for Accident Reconstruction, S. 8

¹⁵¹ ISO15622 (2002): Transport information and control systems - Adaptive Cruise Control Systems - Performance requirements and test procedures, S. 9

¹⁵² Untersuchungen mit Probanden im realen Straßenverkehr zeigen, dass Fahrer im Normalbetrieb eine Verzögerung von 2,5-4 m/s^2 wählen (vgl. Fuchs (1993): Beitrag zum Verhalten von Fahrer und Fahrzeug bei Kurvenfahrt, S. 59).

Tabelle 4-3: Parametrierung der Gate-Annäherungsfunktion

Parameter	Formelzeichen	Wert
Dauer der ersten Verzögerungsstufe	Δt_{A1}	1 s
Verzögerung in der ersten Verzögerungsstufe	D_1	1 m/s ²
Verzögerung in der zweiten Verzögerungsstufe	D_2	3 m/s ²
Zeitkonstante	τ	0,2 s

Das Regelziel $\Delta t_A \geq \Delta t_{E,\min}$ ist mit dieser Parametrierung ab einer Geschwindigkeit zu Beginn der zweiten Verzögerungsphase v_{A2} von 3 m/s erfüllt. Wie in Abschnitt 4.3.1 beschrieben, wird angenommen, dass dem menschlichen Fahrer eine Differenzierung des Anhaltevorgangs unterhalb dieser Geschwindigkeit nicht möglich ist. Somit ist auch eine Gewährleistung der Entscheidungszeit von 2 s unterhalb dieser Geschwindigkeit nicht erforderlich.

Abbildung 4-8 zeigt die Geschwindigkeitsverläufe für die drei in Abbildung 4-4 identifizierten Fälle des Zeitpunkts der Gate-Freischaltung.

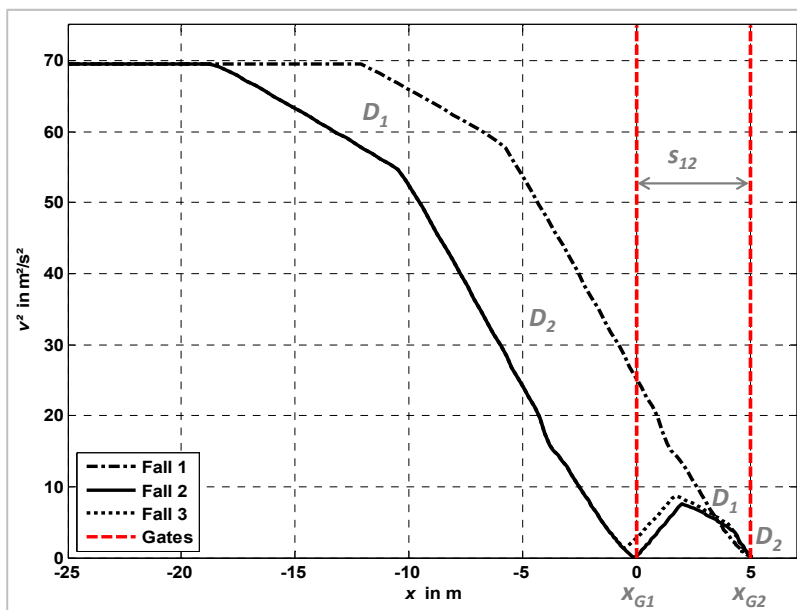


Abbildung 4-8: Geschwindigkeitsverlauf des realisierten Regelverhaltens der Gate-Annäherungsfunktion für Gate 2 und drei unterschiedliche Zeitpunkte der Gate-Freischaltung von Gate 1 [Fall 1: Frühes Freischalten von Gate 1, Fall 2: Stillstand an Gate 1, Fall 3: Abbruch des Gate-Annäherungsmanövers für Gate 1].

4.4 Fazit und Diskussion der Ergebnisse

Dieses Kapitel liefert die Grundlagen für die technische Umsetzung des Gate-Konzepts. Als Ergebnis liegen eine Erweiterung der grundlegenden CbW-Systemarchitektur und

deren regelungstechnische Gestaltung vor. Die Entwicklungsgrundlage bildet die Gewährleistung eines ausreichenden Zeitpotentials für die Entscheidungsfindung durch den Fahrer, um diesen in kooperativer Weise in den Entscheidungsprozess einzubinden. Hierfür wird eine minimale Entscheidungszeit des Fahrers von 2 s angenommen, die während der zwischen zwei Gates zu passierenden Wegstrecke oder während der Ausführung des Gate-Annäherungsmanövers zur Verfügung stehen muss. Eine analytische Betrachtung des Gate-Annäherungsmanövers und eine Analyse der Einflussparameter auf das Zeitpotential für die Entscheidungsfindung zeigen die Notwendigkeit einer geeigneten Regelstrategie. Aus der Diskussion und Bewertung unterschiedlicher Regelstrategien, auf Grundlage der genannten und weiteren Anforderungen, zeigt sich die Signalverzögerung als zu präferierende Lösung. Diese besteht aus einer zweistufigen Verzögerung, mit einer ersten leichten Verzögerungsphase und einer zweiten stärkeren Zielbremsung bis zu der Gate-Position.

Eine prototypische Umsetzung dieser Regelstrategie erfolgt in der Simulationsumgebung IPG CarMaker unter Nutzung der Matlab/Simulink-Schnittstelle. Diese zeigt die prinzipielle regelungstechnische Realisierbarkeit der ausgewählten Strategie und des Gate-Konzepts im Allgemeinen, lässt jedoch weiteren Optimierungsraum. Dieses gilt insbesondere für die Berechnung der Sollbeschleunigung $a_{x, \text{Gate}}$. In der beschriebenen Reglerausführung erfolgt in den in Abbildung 4-3 dargestellten Fällen 2 und 3 des Zeitpunkts der Gate-Freigabe, ein abrupter Wechsel von der Beschleunigungs- in die Verzögerungsphase. Für die in Kapitel 6 beschriebene Evaluierung des Gate-Konzepts in einem statischen Simulator ist dies aufgrund der fehlenden kinästhetischen Rückmeldung weniger störend. Für eine spätere Realisierung in einem realen Fahrzeug ist jedoch eine Glättung des Beschleunigungsverlaufs im Hinblick auf den Fahrkomfort und die damit einhergehende Akzeptanz des Fahrers anzustreben. Als weiteren positiven Nebeneffekt könnte hierdurch eine Erhöhung des Zeitpotentials für die Entscheidungsfindung einhergehen.

5 Maschinelle Umfeldwahrnehmung

Es ist offensichtlich, dass eine technische Realisierung des Gate-Konzepts eine maschinelle Wahrnehmung des Fahrzeugumfelds erfordert. Diese ist einerseits notwendig, um die während der Manöverausführung zu passierenden Entscheidungspunkte sicher und eindeutig zu identifizieren und andererseits, um die Entscheidungsassistenz in Abhängigkeit des jeweiligen CbW-Automationsgrades darstellen zu können.

Gegenstand dieses Kapitels ist die systematische Ermittlung der Anforderungen an die Umfeldwahrnehmung eines CbW-Fahrzeugs und die Bewertung der technischen Realisierbarkeit mit dem heutigen Stand der Technik und Forschung. Zu den ermittelten Anforderungen zählen die Umfelderkennung in Form der mit dem erforderlichen Abdeckungsbereich einhergehenden Sensorreichweiten, aber auch die, aus dem für die Entscheidungsfindung erforderlichen Informationsbedarf abgeleiteten, Anforderungen an die Interpretation des Umfelds und somit an die Umfelderkennung. Das Ziel dieser Analyse ist die Identifikation des realisierbaren Nutzungskontextes sowie der darstellbaren Systemausprägungen.

Die Grundlage dieser Untersuchung bildet eine Top-down-Methodik zur Analyse des Entscheidungsprozesses während der Annäherung an ein Gate und des hierbei in unterschiedlichen Szenarien existierenden Informationsbedarfs. Abschließend erfolgt eine Bewertung der technischen Realisierbarkeit durch einen Vergleich der ermittelten Anforderungen mit dem heutigen Stand der Technik und Forschung im Bereich der maschinellen Umfeldwahrnehmung.

5.1 Analyse des Entscheidungsprozesses

Die Identifikation der Anforderungen an die maschinelle Umfeldwahrnehmung eines CbW-Fahrzeugs, die sich aus dem zuvor beschriebenen und entwickelten Interaktionskonzept zwischen Fahrer und Automation ergibt, basiert auf einer Analyse des Entscheidungsprozesses während der Annäherung an ein Gate. Dieser lässt sich, wie in Abbildung 5-1 dargestellt, in mehrere Schritte unterteilen. Den Ausgangspunkt bildet der Zustand der entscheidungsfreien Fahrt, in dem die Fahrzeugführung von einer aktivierten longitudinalen und einer lateralen Fahrfunktion ausgeführt wird.

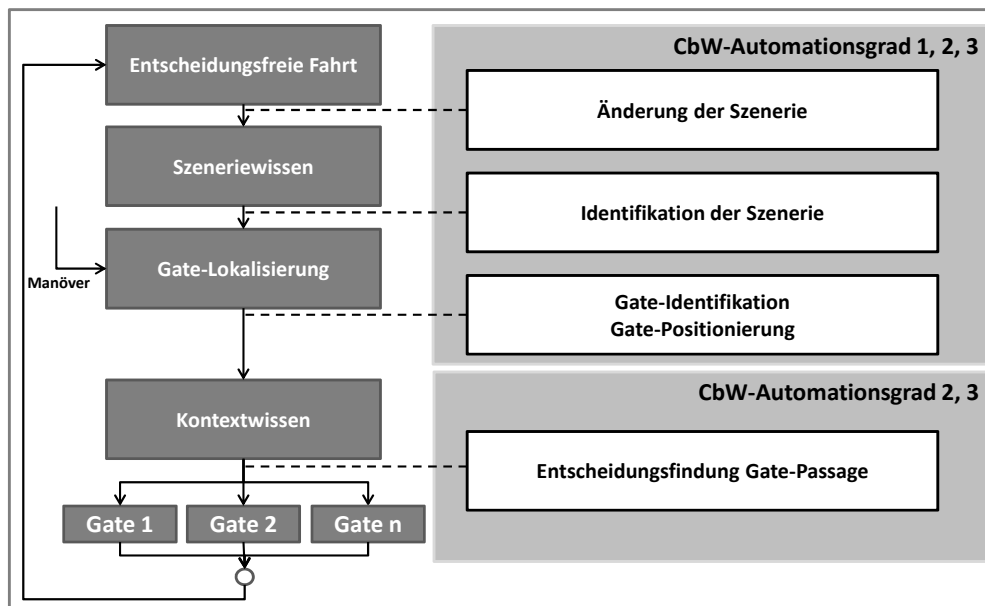


Abbildung 5-1: Entscheidungsprozess während der Annäherung an ein Gate (in Anlehnung an Geyer et al.¹⁵³)

Im Falle einer Änderung der Szenerie, beispielsweise der Zufahrt auf einen Kreisverkehr oder auf ein statisches Hindernis im eigenen Fahrstreifen, die zusätzliche Entscheidungen hinsichtlich der Fortführung der Manöverausführung erfordert, endet die entscheidungsfreie Fahrt. Die Erkennung dieses Zustandsübergangs bedingt seitens der Automation die Fähigkeit, die Kriterien zu identifizieren, die eine Widerlegung der Grundhypothese des Zustands der entscheidungsfreien Fahrt ermöglichen. Im Falle des höchsten CbW-Automationsgrades ist dieses Szeneriewissen zudem für die Überprüfung der Ausführbarkeit der vom Fahrer beauftragten Manöver erforderlich. Dies ist notwendig, da dieser Automationsgrad hinsichtlich der Manöverausführung dem vollautomatisierten Fahren ähnelt. Hierbei kann, im Gegensatz zu den anderen beiden Automationsgraden, die immer eine Handlung vom Fahrer erfordern, nicht angenommen werden, dass der Fahrer die Manöverausführung permanent und aufmerksam verfolgt. Hierdurch besteht die Gefahr, dass Fehlentscheidungen der Automation nicht vom Fahrer bemerkt werden und dies somit ein Sicherheitsrisiko darstellt.

Die Lokalisierung der Gates erfolgt im ersten Schritt über die Gate-Identifikation, die auf einer logischen Zuordnung der die Szenerie beschreibenden Parameter, des aktuell ausgeführten Fahrmanövers und der als Regelwerk hinterlegten Definition der Gate-Positionen und des jeweils zugewiesenen Informationsbedarfs basiert und demnach keine zusätzlichen Anforderungen an die Umfeldwahrnehmung stellt. Im darauf folgenden Schritt werden die Gate-Positionen in Abhängigkeit der aktuellen Umfelddaten (bspw. der Erkennung von Fahrstreifenmarkierungen) bestimmt. Die beschriebenen

¹⁵³ Geyer et al. (2012): Ermittlung der Anforderungen an die Umfelderkennung für Conduct-by-Wire, S. 8

Prozessschritte ermöglichen somit eine Lokalisierung der in der jeweiligen Szenerie für das vom Fahrer beauftragte Manöver zu passierende Gate, was die Grundlage aller drei CbW-Automationsgrade bildet.

Die sich aus dem Interaktionskonzept ergebenden Anforderungen an die maschinelle Umfeldwahrnehmung beschränken sich im Falle des niedrigsten CbW-Automationsgrades auf diese ersten beiden Prozessschritte „Szeneriewissen“ und „Gate-Lokalisierung“, da die Entscheidung bezüglich dem Verhalten am Gate vom Fahrer, ohne weitere Unterstützung durch die Automation, getroffen wird. Die CbW-Automationsgrade 2 und 3, bei denen die Automation einen Vorschlag beziehungsweise eine Entscheidung über das Verhalten am Gate trifft, erfordern jedoch zusätzliches Kontextwissen über die aktuelle Szene (bspw. über die Trajektorien der sich auf der Kreisbahn befindenden Objekte), um den Informationsbedarf zur Entscheidungsfindung während der Annäherung oder am Gate decken und somit eine Entscheidung treffen zu können. Sobald alle Gates in einem Szenario passiert sind, wird wieder der Ausgangszustand der entscheidungsfreien Fahrt erreicht.

Jeder dieser Teilschritte des Entscheidungsprozesses stellt unterschiedliche Anforderungen an die maschinelle Umfeldwahrnehmung, welche in dem folgenden Abschnitt systematisch identifiziert werden.

5.2 Anforderungsanalyse

Die Anforderungen, die das entwickelte Interaktionskonzept an die maschinelle Umfeldwahrnehmung eines CbW-Fahrzeugs stellt, werden für den in Abschnitt 3.2 entwickelten Katalog repräsentativer Szenarien ermittelt. Hierbei sind an verschiedenen Stellen Annahmen erforderlich, die jeweils dem Ziel einer Worst-Case-Abschätzung entsprechend getroffen werden und die den jeweiligen Abschnitten zu entnehmen sind. Grundsätzlich wird für diese Analyse angenommen, dass sich alle Verkehrsteilnehmer in den betrachteten Szenarien, das CbW-Fahrzeug eingeschlossen, regelkonform gemäß der Straßenverkehrsordnung verhalten. Dies betrifft beispielsweise die Einhaltung von Vorfahrtsregelungen oder das Befolgen der Signalisierung von Lichtsignalanlagen. Einzig bei der Annahme von Geschwindigkeiten wird im Sinne der Worst-Case-Abschätzung und dem in der Realität beobachtbaren Fahrerverhalten¹⁵⁴ eine Abweichung vom regelkonformen Verhalten angenommen.

¹⁵⁴ Fahrerverhaltensbeobachtungen innerhalb geschlossener Ortschaften zeigen, dass Fahrer die zulässige Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h um bis zu 22 km/h überschreiten (vgl. Berndt et al. (2007): Driver Braking Behavior during Intersection Approaches and Implications for Warning Strategies for Drivers Assistant Systems).

5.2.1 Szeneriewissen

Das Szeneriewissen stellt die Grundlage für den folgenden Schritt der Gate-Lokalisierung und für die Bewertung der Ausführbarkeit des durch den Fahrer beauftragten Fahrmanövers dar. Der Informationsbedarf zur Erkennung eines Szenerieübergangs mit Entscheidungsbedarf ist für die jeweiligen Szenerieklassen des zu Grunde gelegten Katalogs in Anhang D.1 zu entnehmen. Die Deckung des Informationsbedarfs erfordert im Wesentlichen die Erkennung von Fahrbahnmarkierungen, baulichen Begrenzungen, Einmündungen, Verkehrsschildern sowie Lichtsignalanlagen. Wie in Abschnitt 3.1 dargestellt, überführt die Automation das Fahrzeug durch Anhalten am Gate in einen sicheren Zustand, sofern keine Entscheidung über das Verhalten am Gate getroffen wird. Der Zeitpunkt der Initiierung des Gate-Annäherungsmanövers hängt dabei von der Ausgangsgeschwindigkeit des CbW-Fahrzeugs und der gewählten Regelstrategie der Gate-Annäherungsfunktion ab. Für die in dem vorherigen Kapitel entwickelte Strategie einer zweistufigen Signalverzögerung ergeben sich gemäß Formel (4.8) und der Parametrierung aus Tabelle 4-3 die in Abbildung 5-2 dargestellten Abstände zum Gate, bei denen die Initiierung des Gate-Annäherungsmanövers erfolgt. Somit ergeben sich für die Annahme einer Überschreitung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 20 km/h innerhalb geschlossener Ortschaften Abstände von etwa 75 m und außerhalb geschlossener Ortschaften von knapp über 200 m. Demnach müssen die Informationen zur Identifikation der Szenerie und somit zur Erkennung des Endes der entscheidungsfreien Fahrt spätestens in der berechneten Entfernung zum jeweiligen ersten Gate vorliegen.

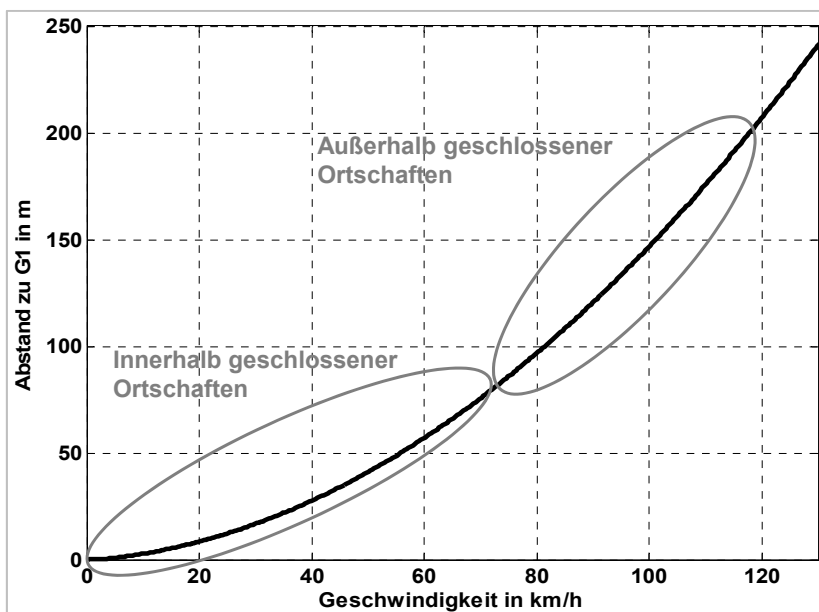


Abbildung 5-2: Abstand zum ersten Gate (G1) bei Initiierung des Gate-Annäherungsmanövers für die Signalverzögerung in Abhängigkeit der Ausgangsgeschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs

5.2.2 Gate-Lokalisierung

Wie in Abschnitt 5.1 dargestellt, erfolgt die Gate-Identifikation als Grundlage für die darauf folgende Gate-Lokalisierung auf Basis einer logischen Verknüpfung von identifizierter Szenerie und hinterlegtem Regelwerk. Die Definition der Gate-Positionen und der daraus abgeleitete Informationsbedarf für die in Abschnitt 3.2 systematisch ermittelten Szenarien ist der Aufstellung in Anhang C zu entnehmen. Die Gate-Identifikation erfordert im Wesentlichen die Erkennung realer (beispielsweise Fahrstreifenmarkierungen) beziehungsweise die Identifizierung virtueller (beispielsweise die Verbindung unterbrochener Fahrstreifenbegrenzungen) Fahrbahnmarkierungen. In Abhängigkeit der in einer Szenerie existierenden Fahrbahnmarkierungen und der gewählten Trajektorie zur Manöverausführung sind demnach unterschiedliche Definitionen für ein Gate möglich. Die Deckung des Informationsbedarfs, welcher die Positionierung des ersten Gates der die entscheidungsfreie Fahrt beendenden Szenerie ermöglicht, ist hierbei unmittelbar nach der Identifikation der Szenerie erforderlich. In Szenarien, bei denen es in Abhängigkeit der Szenerie und des beauftragten Manövers zu einer Abfolge mehrerer Gates kommen kann, ist die Deckung des Informationsbedarfs zur Positionierung eines Gates spätestens an der Position des davor liegenden Gates erforderlich.

5.2.3 Kontextwissen

Entscheidungsfindung durch die Automation

Den letzten Prozessschritt der Entscheidungsfindung bildet das Kontextwissen, das es der Automation ermöglicht, eine Entscheidung bezüglich des szenariogerechten Verhaltens an dem nächsten Gate zu treffen. Die beiden möglichen Entscheidungen „Gate passieren“ und „Gate nicht passieren“ führen zu unterschiedlichen Anforderungen an die maschinelle Umfelderkennung, die sich aus der in Abbildung 5-3 dargestellten Entscheidungsfindung der Automation in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Umfeldinformationen ergeben. Im Falle eines detektierten und die Sicherheit der Manöverausführung gefährdenden Objekts erfolgt die Entscheidung, das nächste Gate nicht zu passieren. Diese Strategie entspricht der Gestaltung heutiger kollisionsvermeidender FAS (Collision Mitigation Systems, CMS), die den Fahrer im Falle eines detektierten potentiellen Kollisionsobjekts warnen beziehungsweise mit dem Ziel der Kollisionsvermeidung in die Fahrzeugführung eingreifen. Für die Realisierung des Gate-Konzepts im Kontext der teilautomatisierten, manöverbasierten Fahrzeugführung besteht jedoch ein bedeutender Unterschied zu CMS im Umgang mit ausbleibenden Detektionen. Einerseits impliziert eine, aufgrund einer nicht erfolgten Detektion, ausbleibende Warnung des CMS keine Gefahrlosigkeit, andererseits wird das Risiko im Vergleich zu der Fahrt ohne CMS aber auch nicht erhöht. Eine direkte Interpretation einer ausbleibenden

Detektion, das nächste Gate zu passieren, ist im Falle von CbW nicht zulässig. Die auf diese Weise dem Fahrer suggerierte Gefahrlosigkeit kann im Gegensatz zu CMS das Risiko bei einer nicht situationsgerechten Entscheidung erhöhen. Aus diesem Grund muss von der Automation im Falle einer ausbleibenden Detektion zusätzlich sichergestellt werden, dass der für die Entscheidungsfindung erforderliche Informationsbereich durch die maschinelle Umfelderkennung abgedeckt ist. Dies sei am Beispiel einer Kreuzungsszene veranschaulicht, der sich das Ego-Fahrzeug nähert. Solange der relevante Bereich der vorfahrtsberechtigten Kreuzungszufahrten aufgrund von Hindernissen durch die maschinelle Umfelderkennung nicht abgedeckt wird und somit keine sich der Kreuzung nähernden Objekte detektiert werden können, darf die Entscheidung zum Passieren des Gates durch die Automation nicht erfolgen, da keine sichere Manöverausführung gewährleistet werden kann. Basieren die Entscheidungen auf fehlerhaften Detektionen, kann es zu den in Abschnitt 3.1.1 beschriebenen Fehlerarten des Falsch-Positiv-Fehlers und des Falsch-Negativ-Fehlers kommen, deren Korrektur durch den menschlichen Fahrer bei der Gestaltung des Interaktionskonzept berücksichtigt wurde.

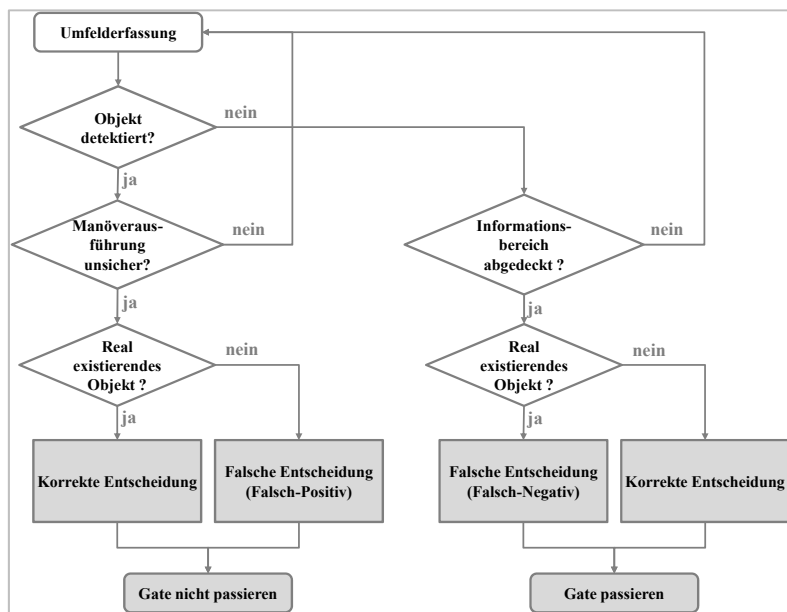


Abbildung 5-3: Entscheidungsfindung der Automation in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Umfeldinformationen

Neben der Fähigkeit, die Abdeckung der für die Entscheidungsfindung erforderlichen Informationsbereiche durch die maschinelle Umfelderkennung bestimmen zu können, besteht eine weitere grundlegende Anforderung an die zu realisierenden Sensorreichweiten. Die Bestimmung der Mindestsensorreichweiten für eine sichere Manöverausführung wird im folgenden Abschnitt betrachtet.

Erforderliche Umfeldabdeckung

Der aus dem Kontextwissen abgeleitete und für die Entscheidungsfindung erforderliche Informationsbedarf für die zu Grunde gelegten Szenarien lässt sich einer der folgenden drei Gruppen zuweisen:

- Signalisierung von Lichtsignalanlagen
- Vorfahrtsberechtigte Verkehrsteilnehmer
- Detektion des für die Manöverausführung erforderlichen Freiraums

Geyer et al.¹⁵⁵ beschreiben detailliert das Vorgehen einer Worst-Case-Abschätzung der minimal erforderlichen Sensorreichweiten. Die Berechnung der erforderlichen Sensorreichweiten basiert dabei auf verschiedenen Annahmen. Die angenommene Parametrierung der Szenerie orientiert sich an Vorgaben aus den Richtlinien für die Anlage von Straßen. Folgende Parameter, die die Informationsverfügbarkeit negativ beeinflussen, werden zunächst vernachlässigt:

- Krümmung des Fahrbahnverlaufs mit Ausnahme der Krümmung der Kreisbahn eines Kreisverkehrs
- Schnittwinkel der Fahrbahnen an Knotenpunkten
- Lateraler Versatz gegenüberliegender Kreuzungsausfahrten
- Sichtverdeckungen an Einmündungen

Aus den Betrachtungen von Geyer et al. ergeben sich für die Szenarien des dieser Arbeit zugrunde gelegten Kataloges die höchsten Anforderungen aus der Deckung des Informationsbedarfs hinsichtlich der Detektion vorfahrtsberechtigter Verkehrsteilnehmer in Kreuzungsszenarien. Im Folgenden erfolgt daher im Sinne einer Worst-Case-Abschätzung die Betrachtung von Kreuzungsszenarien für das im vorherigen Kapitel dargestellte Reglerverhalten. Die Abschätzung der erforderlichen Reichweite der Umfeldsensorik erfolgt gemäß dem verfolgten Worst-Case-Ansatz für die in Abbildung 5-4 dargestellten Extrembetrachtungen. Erstere ist der Zustand, in dem die Entscheidung über das Passieren des Gates erst an dem Gate selbst getroffen wird. In diesem Fall befindet sich das CbW-Fahrzeug nach vollständiger Ausführung des Gate-Annäherungsmanövers im Stillstand. Die zweite Abschätzung erfolgt für den Fall, bei dem die Manöverausführung nicht durch die Aktivierung des Gate-Annäherungsmanövers unterbrochen wird. Dies entspricht einer Deckung des Informationsbedarfs vor der Initiierung des Gate-Annäherungsmanövers in der von der Ausgangsgeschwindigkeit gemäß Abbildung 5-2 abhängigen Entfernung zum ersten Gate.

¹⁵⁵ Geyer et al. (2012): Ermittlung der Anforderungen an die Umfelderkennung für Conduct-by-Wire

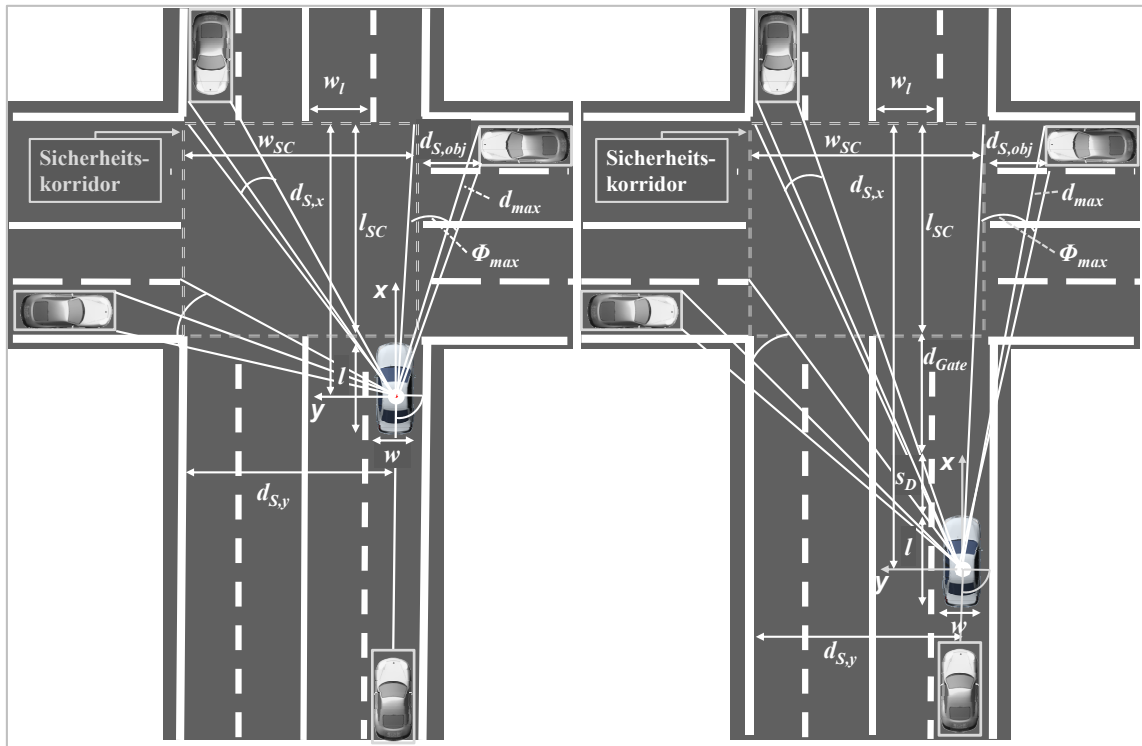


Abbildung 5-4: Bestimmung der Sensorreichweiten am Beispiel eines Kreuzungsszenarios

Die erforderlichen Sensorreichweiten ergeben sich aus dem in Abschnitt 4.1.3 eingeführten Entscheidungsmodell der Automation, das auf der Definition eines Sicherheitskorridors und der für die Manöverausführung erforderlichen Zeit Δt_{ME} gemäß Formel (4.2) basiert. Hieraus lässt sich mit der Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs v_{ego} , der Detektionsdauer Δt_D , dem Abstand vom Fahrzeugmittelpunkt bis zum Ende des Sicherheitskorridors und der Geschwindigkeit der sich dem Sicherheitskorridor nähernden Objekte v_{obj} die Mindestreichweite der Umfeldsensorik berechnen. Die Angaben der Reichweiten in x - und y -Richtung sowie die Bewegungsrichtungen beziehen sich auf das in Abbildung 5-4 dargestellte fahrzeugeigene Koordinatensystem, dessen Ursprung in der Fahrzeugmitte liegt.

$$R_x = v_{Ego} \cdot \Delta t_D - v_{Object} \cdot \Delta t_{ME} + d_{S,x} \quad (5.1)$$

$$R_y = d_{S,y} - v_{Object} \cdot \Delta t_{ME} \quad (5.2)$$

Für die in diesem Kapitel durchgeführte Bewertung der Eignung unterschiedlicher Sensorprinzipien und -ausführungen lassen sich aus den ermittelten Reichweiten die entsprechenden Vergleichsgrößen ableiten. Für reichweitenbasierte Umfeldsensoren lassen sich der maximale Azimut ϕ_{max} und die maximale Sensorreichweite d_{max} über einfache trigonometrische Beziehungen, bezogen auf den Fahrzeugmittelpunkt berechnen:

$$\phi_{\max} = \arctan\left(\frac{R_{y,\max}}{R_{x,\min}}\right) \text{ und } d_{\max} = \sqrt{R_{x,\max}^2 + R_{y,\max}^2} \quad (5.3)$$

Zusätzlich zu den ermittelten Reichweiten und den daraus abgeleiteten Parametern für reichweitenbasierte Umfellsensoren ist der Ausrichtungswinkel α des Ego-Fahrzeugs bezogen auf die Längsrichtung am jeweiligen Gate zu berücksichtigen. Die für die jeweiligen Szenarien in Anhang D.2 berechneten maximalen Winkel α_{\max} sind zu den berechneten Werten zu addieren.

- Am Gate:

Die Zeit Δt_{ME} , die für die Ausführung eines Manövers aus dem Stillstand erforderlich ist, kann unter Annahme einer konstanten Fahrzeugbeschleunigung a_V mit

$$\Delta t_{ME} = \sqrt{\frac{2s_{ME}}{a_V}} + \Delta t_D \quad (5.4)$$

abgeschätzt werden, wobei s_{ME} für die zurückzulegende Wegstrecke ab dem Gate bis zum Ende der Manöverausrührung steht, welche wiederum von der betrachteten Szenariegeometrie und der angenommenen Trajektorie zur Manöverausrührung abhängt. Die ermittelten Wegstrecken bilden somit die Grundlage für die Ermittlung der aus dem Informationsbedarf abgeleiteten Anforderungen.

- Vor Beginn der Gate-Annäherung:

In der zweiten Extrem Betrachtung werden die Anforderungen an die Umfeld erfassung für die Bedingung ermittelt, dass die Manöverausrührung nicht durch die Aktivierung eines Gate-Annäherungsmanövers unterbrochen wird. Hieraus ergibt sich, dass der aus dem Kontextwissen abgeleitete Informationsbedarf spätestens zum Zeitpunkt der Initiierung des Gate-Annäherungsmanövers gedeckt sein muss. Hierdurch verlängert sich die für die Manöverausrührung erforderliche Wegstrecke s_{ME} und Zeit Δt_{ME} im Vergleich zu der vorherigen Betrachtung einer Entscheidung aus dem Stillstand am Gate.

Die zu berücksichtigende Wegstrecke s_{ME} verlängert sich im Vergleich zu den vorherigen Gleichungen um den geschwindigkeitsabhängigen Abstand zum Gate bei Initiierung der Annäherungsstrategie d_{Gate} gemäß Abbildung 5-2. Die Zeit Δt_{ME} hängt wiederum von dem Geschwindigkeitsprofil über s_{ME} ab. Für ein Manöver, das mit konstanter Geschwindigkeit v_{ego} ausgeführt wird, ergibt sich Δt_{ME} zu:

$$\Delta t_{ME} = \frac{s_{ME} + d_{Gate}}{v_{ego}} + \Delta t_D \quad (5.5)$$

Im Falle eines Manövers, wie beispielsweise dem Linksabbiegen an einer Kreuzung, für dessen Durchführung die Ausgangsgeschwindigkeit von v_{ego} auf die für die Manöverausrührung erforderliche Geschwindigkeit v_{ME} bis zum Gate mit der Verzögerung D_{ego} reduziert wird, ergibt sich Δt_{ME} zu:

$$\Delta t_{ME} = \frac{2D_{ego}d_{Gate} - v_{ego}^2 + v_{ME}^2}{2D_{ego}v_{ego}} + \frac{v_{ego} - v_{ME}}{D_{ego}} + \frac{s_{ME}}{v_{ME}} + \Delta t_D \quad (5.6)$$

Umfelderfassung

Im Gegensatz zu den Darstellungen von Geyer et al.¹⁵⁶ werden die erforderlichen Sensorreichweiten für die im vorherigen Kapitel beschriebene Gate-Annäherungsstrategie der Signalverzögerung bestimmt. Die Berechnungen erfolgen für die in Abbildung 5-4 dargestellte X-Kreuzung mit zwei Fahrstreifen je Richtungsfahrbahn¹⁵⁷ für die beiden beschriebenen Extrembetrachtungen. Für den ersten Fall, dem Stillstand des Ego-Fahrzeugs am Gate, ergeben sich in Abhängigkeit der getroffenen Annahmen¹⁵⁸ und der Geschwindigkeit der anderen Verkehrsteilnehmer die in Abbildung 5-5 dargestellten Sensorreichweiten bezogen auf den Mittelpunkt des Ego-Fahrzeugs. Dies zeigt, dass die Abdeckung der Kreuzungszufahrten Nord, West und Ost eine nahezu vollständige 180°-Abdeckung nach vorne erfordert. Die ermittelte Reichweite liegt für innerstädtische Szenarien mit Geschwindigkeiten von bis zu 70 km/h bei etwa 120 m und steigt für Kreuzungsszenarien außerhalb geschlossener Ortschaften auf 150 m (90 km/h)¹⁵⁹ bis 190 m (120 km/h) an. Durch Berücksichtigung der Ausrichtung des Ego-Fahrzeugs am Gate bei der Ausführung eines Rechtsabbiegemanövers vergrößert sich der für den am Gate ermittelte Azimut um den maximalen Ausrichtungswinkel $\alpha_{I,E,max}$ des Sensorbereichs III. Die ermittelten Öffnungswinkel stellen somit die Worst-Case-Abschätzung dar.

¹⁵⁶ Geyer et al. (2012): Ermittlung der Anforderungen an die Umfeldererkennung für Conduct-by-Wire

¹⁵⁷ Kreuzungen mit mehrstreifigen Gegenverkehrsfahrbahnen sind mit einer getrennten Signalisierung des abbiegenden Verkehrs auszuführen (vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2010): Richtlinien für Lichtsignalanlagen RiLSA, Abschnitt 2.3.2.1 Linksabbieger, S. 13-14). Hierdurch entfällt die erforderliche Berücksichtigung vorfahrtsberechtigter Verkehrsteilnehmer aus Richtung Norden, Westen und Osten.

¹⁵⁸ Die Berechnungen basieren auf den folgenden Annahmen für das Ego-Fahrzeug: $l = 4,8$ m; $w = 2$ m; $a_v = 2$ m/s²; $D_{ego} = 3$ m/s²; $a_{y,max} = 4$ m/s²; $\Delta t_D = 1$ s und für die Kreuzungsszenarie: $l_{SC} = w_{SC} = 14$ m

¹⁵⁹ Die zulässige Geschwindigkeit an Knotenpunkten außerhalb geschlossener Ortschaften ist auf 70 km/h begrenzt (vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (1988): Richtlinie für die Anlage von Straßen (RAS), Abschnitt 1.1.4 Entwurfsprinzipien, S. 11)

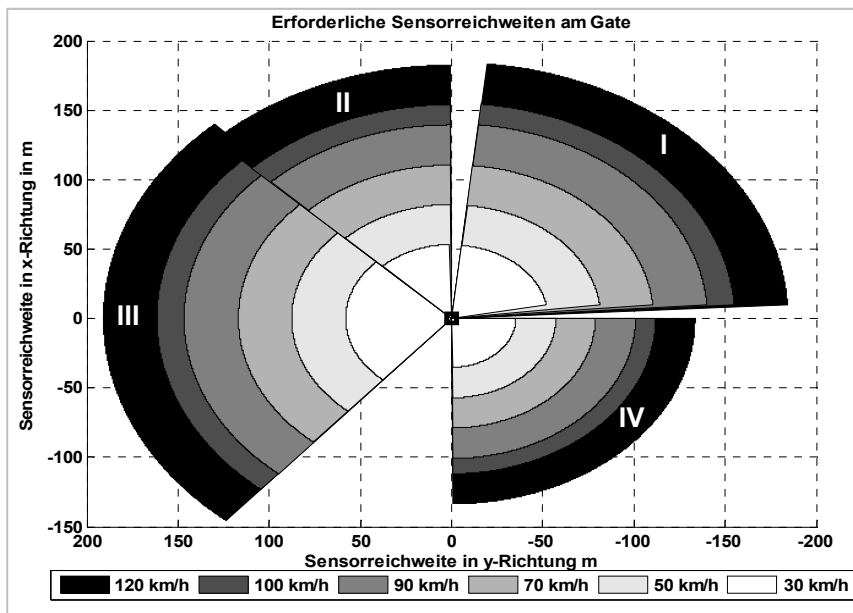


Abbildung 5-5: Abschätzung der erforderlichen Abdeckung der maschinellen Umfelderkennung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit der sich einer Kreuzung nähernden Verkehrsteilnehmer bezogen auf den Schwerpunkt des am Gate stehenden Ego-Fahrzeugs ($x = 0$ m; $y = 0$ m)

Für den zweiten Fall, der Deckung des Informationsbedarfs vor Initiierung des Gate-Annäherungsmanövers reduzieren sich die erforderlichen Öffnungswinkel bei gleichzeitiger Erhöhung der Sensorreichweiten für die Sensorbereiche I-III. Die erforderliche Sensorreichweite für den Sensorbereich IV reduziert sich aufgrund der Relativgeschwindigkeit zwischen dem Ego-Fahrzeug und den sich hinter dem Ego-Fahrzeug der Kreuzung nähernden Verkehrsteilnehmern. Abbildung 5-6 zeigt eine exemplarische Betrachtung der Entwicklung der erforderlichen Sensorreichweiten für repräsentative Kombinationen der Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs und anderer Verkehrsteilnehmer für den Sensorbereich II. So erhöht sich die erforderliche Sensorreichweite bis 70 km/h auf etwa 300 m und bis 90 km/h auf etwa 450 m.

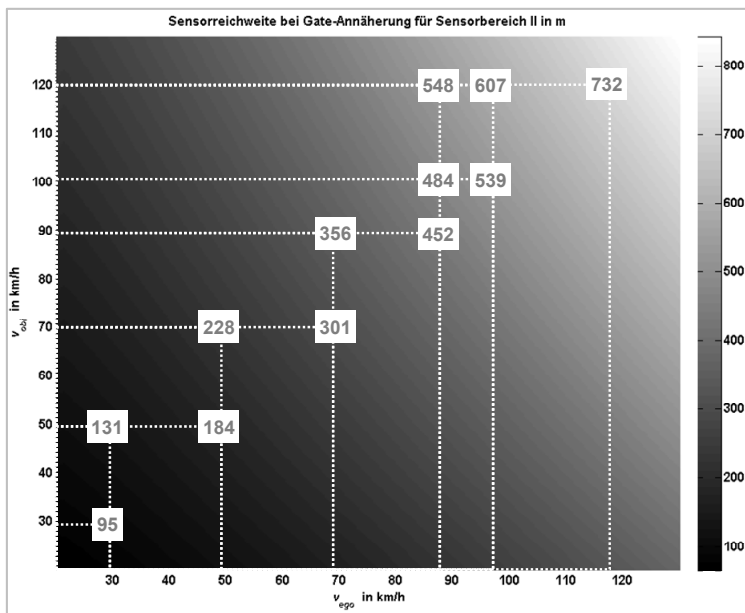


Abbildung 5-6: Abschätzung der erforderlichen Abdeckung der maschinellen Umfelderkennung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs und der sich einer Kreuzung nähernden Verkehrsteilnehmer für den Sensorbereich II

Abbildung 5-7 zeigt die Reduktion des erforderlichen Azimut über der Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs für den gleichen Sensorbereich.

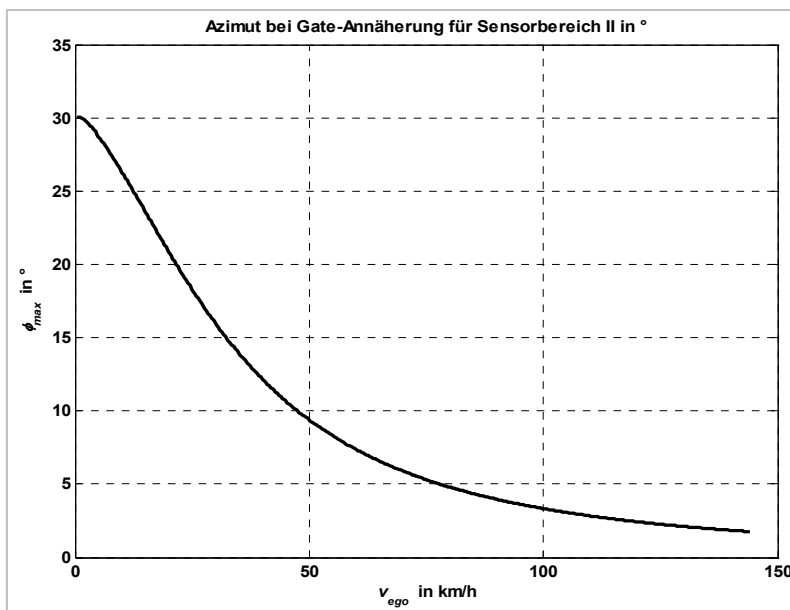


Abbildung 5-7: Abschätzung des erforderlichen Azimut der maschinellen Umfelderkennung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs für den Sensorbereich II

Auf eine Betrachtung der Sensorbereiche I und III wird an dieser Stelle verzichtet, da die erforderlichen Sensorreichweiten aufgrund zu erwartender baulicher Sichtbehinderungen nur selten dargestellt werden können. Dies bedeutet, dass die Initiierung des Gate-Annäherungsmanövers in den Szenarien, in denen der Fahrer eines CbW-

Fahrzeugs das Einbiegen oder Kreuzen auf eine übergeordnete Straße beauftragt, nicht vermieden werden kann. Aufgrund der gemäß der RAS_t einzuhaltenden und auf das Sichtfeld des Fahrers bezogenen Sichtweiten an Knotenpunkten¹⁶⁰ kann der Fahrer in diesen Szenarien jedoch vor Erreichen des Gates die Entscheidung in kooperativer Weise treffen.

Umfeldererkennung

Neben den zuvor ermittelten Sensorreichweiten als zu erfüllende Anforderung an die maschinelle Umfelderkennung, lässt sich aus der Analyse des Entscheidungsprozesses der jeweilige Informationstyp als Anforderung an die Umfelderkennung ableiten. Für den dieser Arbeit zu Grund gelegten Szenarienkatalog ergibt sich die in Abbildung 5-8 dargestellte Differenzierung des Informationstyps und der geschwindigkeitsabhängigen Sensorreichweite.

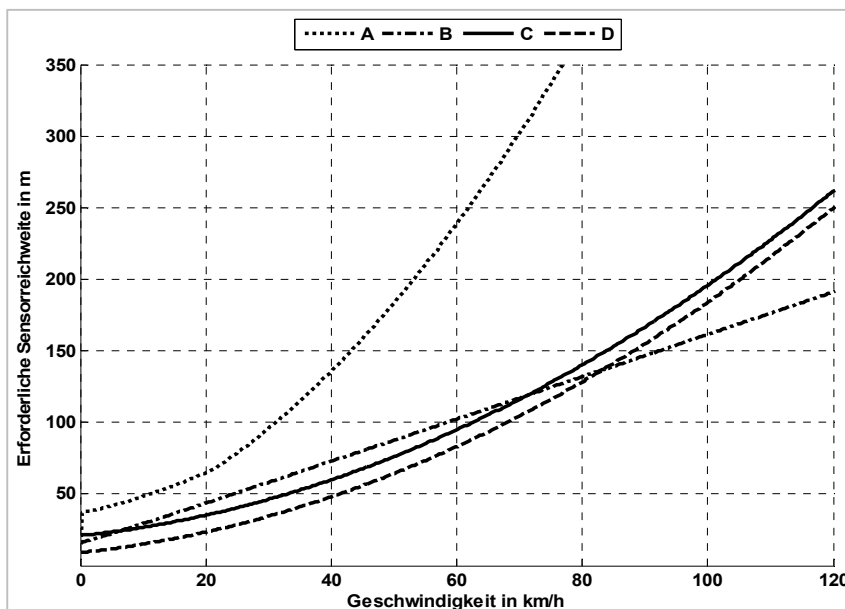


Abbildung 5-8: Differenzierung der geschwindigkeitsabhängigen Sensorreichweite nach dem Informationstyp [A: Bewegte Objekte mit $v_{obj} = v_{ego}$ | B: Bewegte Objekte bei $v_{ego} = 0$ | C: Fußgänger, Radfahrer, Freiraum | D: Verkehrszeichen, Signalisierung, Fahrbahnmarkierung, Einmündungen, Borde, bauliche Begrenzungen]

¹⁶⁰ Bei einer zulässigen Geschwindigkeit von 50 km/h beträgt die einzuhaltende laterale Sichtweite in einer Entfernung von 5 m zur Kreuzungseinfahrt 70 m. (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2006): Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen RAS_t 06, Abschnitt 6.3.9.3 Sichtfelder, S.124)

5.3 Stand der Technik und Forschung maschinelle Umfeldwahrnehmung

Die Grundlage der Untersuchung der technischen Realisierbarkeit des Gate-Konzepts hinsichtlich der maschinellen Umfeldwahrnehmung bildet eine Ermittlung des Standes der Technik der im Automobilbereich eingesetzten Sensorprinzipien. Hierzu zählen Radar, Lidar, Kamera, 3D-ToF, Ultraschall sowie die Nutzung digitaler Karten in Kombination mit der Satellitennavigation. Die folgende Betrachtung konzentriert sich dabei auf heute in der Serie eingesetzte beziehungsweise marktauglich integrierbare Sensorkonzepte. Ausschließlich im Bereich der Forschung eingesetzte Sensorprinzipien, für die Einführungszenarien in die Serie nicht absehbar sind, werden daher nicht betrachtet. Gleiches gilt für kommunikationsbasierte Car2X-Lösungen. Neben der derzeit noch schwachen Verbreitung und den sich nur zögerlich abzeichnenden Einführungszenarien¹⁶¹ besteht der Grund in dem Prinzip der Informationsgewinnung. Für die Deckung des Informationsbedarfs für die Entscheidungsfindung bezüglich dem Verhalten am nächsten Gate über eine kommunikationsbasierte Lösung ist das CbW-Fahrzeug, im Gegensatz zu den anderen genannten umfelderfassenden Sensorprinzipien, auf das aktive Senden der Information durch die anderen Verkehrsteilnehmer angewiesen. Somit genügt ein Fahrzeug, das fehlerhaft oder nicht sendet, um die Sicherheit zu gefährden. Demnach gewährleistet selbst eine Ausstattungsrate von 100 % keine absolute Sicherheit bezüglich des Nichtvorhandenseins anderer Verkehrsteilnehmer.

Im Folgenden erfolgt eine Kurzdarstellung der genannten Sensorprinzipien in Form einer Beschreibung des Funktionsprinzips, der Leistungskennwerte sowie der Anwendungsbereiche heutiger am Markt verfügbarer Sensorausführungen.

5.3.1 Radarsensorik

Das Messprinzip von Radar (Radio Detection and Ranging) basiert auf der gebündelten Aussendung elektromagnetischer Wellen und dem anschließenden Empfang der reflektierten Wellenanteile. Für die Anwendung im öffentlichen Straßenverkehr werden derzeit zwei Frequenzbänder genutzt. Fernbereichsradare („Long range“) operieren bei einer Trägerfrequenz von 77 GHz und Nahbereichsradare („Short range“) bei einer Frequenz von 24 GHz. Durch Ausnutzung des Dopplereffekts ermöglichen Radarsensoren eine direkte Messung der Relativgeschwindigkeit von Reflexionspunkten. Die Mes-

¹⁶¹ In einem Memorandum of Understanding haben sich verschiedene Fahrzeughersteller darauf verständigt, erste kommunikationsbasierte Funktionen ab dem Jahr 2015 anzubieten (vgl. Car2Car Communication Consortium (2012): European vehicle manufacturers working hand in hand on deployment of cooperative Intelligent Transport Systems and Services (C-ITS)).

sung des Abstands erfolgt über eine Laufzeitmessung („Time of flight“), die Winkelmessung über mehrere statische und sich überlappende Antennenkeulen oder mittels mechanisch scannender Antennen. Die am häufigsten angewandten Frequenzmodulationsverfahren sind die Dauerstrich-Frequenzmodulation (Frequency Modulated Continuous Wave, FMCV) und die Pulskompression (Chirp Sequence Modulation). Die Leistungsfähigkeit von Radarsensoren wird über die „Zellgröße“ als Produkt der Trennfähigkeit hinsichtlich Abstand, Relativgeschwindigkeit und Azimut bestimmt. Zusätzlich zu der hohen Messgenauigkeit weisen Radarsensoren eine hohe Witterungs- und Verschmutzungsrobustheit auf. Die Leistungsparameter heutiger Sensorausführungen ermöglichen Reichweiten von 30/60/250 m (SR/MR/LR¹⁶²) und einen Azimut von 120°/60°/20°¹⁶³.

Den Durchbruch im Bereich der Automotive-Anwendung erzielte die Radarsensorik Ende der 1990er Jahre mit der Serieneinführung von ACC-Systemen. Des Weiteren existierende Anwendungen, wie beispielsweise CMS oder Fahrstreifenwechsellassistentz beschränken sich auf die Detektion des Front- und Heckbereichs des Fahrzeugs aufgrund der messprinzipbedingten schlechteren Auflösung lateraler Bewegungen. Fitzek et al.¹⁶⁴ zeigen jedoch das Potential von Radarsensoren für seitliche Anwendungen für ein Objekttracking mit lateraler Geschwindigkeitsschätzung.

5.3.2 Lidarsensorik

Das Messverfahren von Laser- oder, in Anlehnung an Radar, auch Lidar- (Light Detection and Ranging) Sensoren genannt basiert auf der Laufzeitmessung ausgesendeter und reflektierter Lichtpulse im Wellenlängenbereich von Infrarot. Im Gegensatz zu Radar ist mit vertretbarem technischen Aufwand keine direkte Relativgeschwindigkeitsmessung möglich, so dass diese über Differentiation des gemessenen Abstands erfolgt. Die Winkelmessung wird je nach Sensorausführung über einen starren Mehrstrahler („Multibeam“), ein mechanisch geschwenkten Mehrstrahler („Multibeam Sweep“) oder einen scannend ausgeführten Einstrahler („Singlebeam Scan“) realisiert. Den Vorteilen von Lidar-Sensoren hinsichtlich des großen Öffnungswinkels sowie der guten Winkel- und Entfernungsgenauigkeit steht die, im Vergleich zu Radarsensoren, deutlich geringere Witterungs- und Verschmutzungsrobustheit gegenüber. Heutige

¹⁶² SR: Nahbereich (Short range), MR: Mittlerer Entfernungsbereich (Mid range), LR: Fernbereich (Long range)

¹⁶³ Winner (2012): Radarsensorik, S. 152-170

¹⁶⁴ Fitzek et al. (2011): Side Object Tracking Using Automotive Radar With Lateral Velocity Estimation

Sensorausführungen ermöglichen Reichweiten von bis zu 200 m bei einem Azimut von bis zu 110° ¹⁶⁵.

Lidar-Sensoren werden für FAS wie beispielsweise ACC, LDW oder die häufig als „City Stop“ bezeichnete automatische Notbremse im Niedriggeschwindigkeitsbereich eingesetzt. Weitere Anwendungsbereiche der Lidar-Sensorik werden derzeit im Bereich der Forschung intensiv untersucht. So zeigen Dietmayer et al.¹⁶⁶ und von Reyher¹⁶⁷ deren Eignung zur Erkennung von Fahrstreifenbegrenzungsmarkierung und Steinemann et al.¹⁶⁸ deren Eignung zur Typisierung und Bestimmung der geometrischen Ausdehnung von Objekten durch Messung der 3D-Kontour. Müller et al.¹⁶⁹ untersuchen die Eignung von Lidar-Sensoren zur Erkennung von Kreuzungen, Rasshofer et al.¹⁷⁰ demonstrieren einen designkonformen und somit seriennahen Einbau von vier Lidar-Sensoren zur Realisierung einer 360°-Abdeckung des Fahrzeugumfelds. Der insbesondere im Bereich der Forschung zu vollautomatisierten Fahrzeugführungskonzepten intensiv eingesetzte und aufgrund seiner technischen Leistungsfähigkeit beeindruckende „Velodyne-Sensor“¹⁷¹ wird im Folgenden aufgrund der nicht absehbaren Integrierbarkeit in heutige Fahrzeugkonzepte nicht bei der Bewertung berücksichtigt.

5.3.3 Kamerasysteme

Die Nutzung von Kamerasystemen zur maschinellen Wahrnehmung des auf den menschlichen, visuellen Informationsverarbeitungsprozess ausgelegten Verkehrsraums liegt nahe. Das Messprinzip beruht auf der Wandlung von Lichtmustern in mehrdimensionale Messsignale durch Bildsensoren mit unterschiedlicher Auflösung. Bei Monokamerasystemen ist die Entfernungsmessung nur mit Hilfe zusätzlicher Modelannahmen und einer damit verbundenen Ungenauigkeit möglich. Die Erkennung von Objekten erfolgt durch Detektion des optischen Flusses oder durch Mustererkennung. Die Objekt-

¹⁶⁵ Ibeo Automotive (2013): ibeo Lux Salesblatt

¹⁶⁶ Dietmayer et al. (2005): Roadway Detection and Lane Detection using Multilayer Laserscanner

¹⁶⁷ Reyher (2007): Lidarbasierte Fahrstreifenzuordnung von Objekten für eine Abstandsregelung im Stop&Go-Verkehr

¹⁶⁸ Steinemann et al. (2012): 3D Outline Contours of Vehicles in 3D-LIDAR-Measurements for Tracking Extended Targets

¹⁶⁹ Müller et al. (2012): GIS-basierte topologische Fahrzeuglokalisierung durch LIDAR Kreuzungserkennung

¹⁷⁰ Rasshofer et al. (2006): Rundumsensorik für Fahrerassistenzfunktionen der Zukunft - Herausforderungen und Trends

¹⁷¹ Eine Beschreibung des realisierten Funktionsumfangs findet sich beispielsweise in Levinson et al. (2011): Towards Fully Autonomous Driving: Systems and Algorithms

klassifikation ist insbesondere in komplexen Szenarien und unter unterschiedlichen Blickwinkeln schwierig. Stereokamerasysteme ermöglichen aufgrund der zusätzlichen Tiefeninformation eine modellunabhängige Detektion von Objekten, wodurch auch die Klassifikation erleichtert wird. Somit können die 3D-Positionsinformation mit den 3D-Bewegungsinformationen aus dem optischen Fluss kombiniert werden (6D-Vision¹⁷²). Kamerasysteme ermöglichen neben der Detektion und Klassifikation von Objekten auch die Detektion von Informationen wie beispielsweise dem Signal einer Lichtsignalanlage oder, im Falle von Farbkameras, die Unterscheidung zwischen weißen und gelben Fahrbahnmarkierungen. Die Leistungsfähigkeit von Kamerasystemen wird durch die Abhängigkeit von Fremdlichtquellen und die geringere Witterungs- und Verschmutzungsrobustheit negativ beeinflusst. Heutige Systemausführungen ermöglichen eine Reichweite von maximal 80 m bei einem Öffnungswinkel von bis zu 50°¹⁷³. Die Eignung von Kamera und 3D-ToF zur Fernbereichsabdeckung des Fahrzeugumfelds ist aufgrund der heutigen geringen Auflösungen von Automotive-Kameras beschränkt. Aktuelle Entwicklungen, beispielsweise im Bereich der Unterhaltungselektronik, lassen jedoch in naher Zukunft kostengünstige und leistungsgesteigerte Lösungen erwarten.

Kamerasysteme werden für FAS wie beispielsweise LDW, CMS sowie Verkehrszeichen- und Fußgängererkennung eingesetzt. Im Bereich der Forschung werden die unterschiedlichsten Anwendungen mit dem Ziel der ganzheitlichen Substitution des menschlichen Fahrers als Umfeldsensor untersucht. Einhaus et al.¹⁷⁴ und Hermes et al.¹⁷⁵ zeigen die Leistungsfähigkeit von Kamerasystemen hinsichtlich der Detektion und dem Tracking von Objekten in komplexen innerstädtischen Szenarien. Felisa et al.¹⁷⁶ demonstrieren eine robuste Erkennung von Fahrstreifenmarkierungen in unterschiedlich komplexen Szenarien. Sebsadji et al.¹⁷⁷ und Vacek et al.¹⁷⁸ zeigen die Eignung von Kamerasystemen zur zuverlässigen Detektion unterschiedlicher Fahrbahnmarkierungen wie beispielsweise Fußgängerüberwege oder Richtungsmarkierungen. Duchow¹⁷⁹ untersucht

¹⁷² Franke et al. (2005): 6D-Vision: Fusion of Stereo and Motion for Robust Environment Perception

¹⁷³ Dietmayer et al. (2005): Fusionsarchitekturen zur Umfeldwahrnehmung für zukünftige Fahrerassistenzsysteme, S. 62

¹⁷⁴ Einhaus et al. (2010): Tracking und Bewegungsvorhersage von Fahrzeugen in komplexen Innenstadtszenarien

¹⁷⁵ Hermes et al. (2010): Vehicle Tracking and Motion Prediction in Complex Urban Scenarios

¹⁷⁶ Felisa et al. (2010): Robust monocular lane detection in urban environments

¹⁷⁷ Sebsadji et al. (2010): Robust Road Marking Extraction in Urban Environments Using Stereo Images

¹⁷⁸ Vacek et al. (2007): Road-marking analysis for autonomous vehicle guidance

¹⁷⁹ Duchow (2005): A marking-based, flexible approach to intersection detection

die Erkennung von Kreuzungsszenen und Muffert et al.¹⁸⁰ die Erkennung und kamera-basierte Bewältigung von Kreisverkehrsszenarien. Franke et al.¹⁸¹ demonstrieren die Eignung eines Kamerasystems, das aufgrund einer Fischaugenlinse einen Öffnungswinkel von 150° aufweist, für die Kreuzungsassistenz. Das heute im Bereich der Einparkassistenten bereits in Serie verfügbare „Surround View“, das auf einer Fusion mehrerer um das Fahrzeug positionierter Kameras basiert und eine 360° Umfelderfassung ermöglicht, wird derzeit für den Einsatz bei höheren Geschwindigkeiten weiterentwickelt¹⁸².

5.3.4 3D-ToF

3D-ToF-Sensoren ermöglichen, im Gegensatz zu den bei Kamerasystemen beschriebenen Bildsensoren, das emittierte und empfangene Lichtsignal bereits im Pixel zu korrelieren und die Distanzinformation durch Ermittlung der Phasenverschiebung zu berechnen. Auf diese Weise existiert für das Ausgangssignal eines jeden Bildpunktes eine direkte Beziehung zu der Tiefeninformation. Die Wellenlänge des ausgesendeten Signals liegt im Bereich des nicht sichtbaren nahen Infrarotlichts. 3D-ToF-Sensoren ermöglichen eine dreidimensionale Erfassung des Fahrzeugumfelds mit hoher Auflösung sowie eine Klassifizierung von Objekten. Ein weiterer Vorteil im Vergleich zu herkömmlichen Kamerasystemen besteht in der Unabhängigkeit von Fremdlichtquellen und die Robustheit gegenüber starken Einstrahlungen. Mit heutigen Systemausführungen sind Reichweiten von 70 m¹⁸³ bei einem Azimut von 18° und einer Elevation von 52° erzielbar¹⁸⁴. Die FAS-Anwendung der 3D-ToF-Sensorik steht im Bereich des Fußgängerschutzes kurz vor der Serieneinführung.

5.3.5 Ultraschallsensorik

Ultraschallsensoren senden hochfrequente Schallwellen aus und messen die Distanz zum Reflektionspunkt über die Laufzeitmessung. Die Winkelmessung erfolgt über Triangulation durch Kombination mehrerer Sensoren. Heutige Sensorausführungen ermöglichen eine Reichweite von 3 m bei einem Azimut von 120°¹⁸⁵. Dem Vorteil der

¹⁸⁰ Muffert et al. (2012): May I Enter the Roundabout? A Time-To-Contact Computation Based on Stereo-Vision

¹⁸¹ Franke et al. (2008): Dynamic Stereo Vision for Intersection Assistance

¹⁸² Continental (2013): Continental übernimmt Spezialunternehmen für 360 Grad-Umfelderfassung ASL Vision

¹⁸³ Buxbaum et al. (2012): 3D Time-of-Flight (ToF), S. 197

¹⁸⁴ Ringbeck et al. (2007): A 3D time of flight camera for object detection, S. 8

¹⁸⁵ Noll et al. (2012): Ultraschallsensorik, S. 117

hohen Auflösung der Entfernungsmessung steht die kurze Reichweite der Sensoren gegenüber. Die Anwendung der Ultraschallsensorik ist daher auf die Erfassung statischer Umgebungen bei langsamer Fahrt im Bereich der Einparkassistenten beschränkt. Neueste Entwicklungen ermöglichen eine Abdeckung des Bereichs neben und hinter dem Fahrzeug bis zu einer Eigengeschwindigkeit von 140 km/h¹⁸⁶, wodurch die Ultraschallsensorik auch im Bereich der Fahrstreifenwechselassistenten eingesetzt werden könnte.

5.3.6 Digitale Karten

Digitale Karten stellen in Verbindung mit der Lokalisierung des Ego-Fahrzeugs über Satellitennavigationssysteme eine weitere mögliche Informationsquelle dar. Bei digitalen Karten kann zwischen der einfachen digitalen Karte, wie sie in heutigen Navigationssystemen eingesetzt wird, und der erweiterten digitalen Karte unterschieden werden. Letztere bietet die Möglichkeit, den Informationsgehalt nahezu beliebig, beispielsweise um die Position von Lichtsignalanlagen, zu erweitern und einen künstlichen Vorausschau, den sogenannten e-horizon¹⁸⁷, zu realisieren. Ein Nachteil dieser Informationsquelle ist jedoch die Aktualität des Kartenmaterials sowie die Genauigkeit der Positionsbestimmung des Ego-Fahrzeugs über GPS¹⁸⁸, die innerhalb bebauter Gebiete zusätzlich durch Mehrwegeausbreitungen verschlechtert werden kann¹⁸⁹.

5.3.7 Sensorfusion

Die verschiedenen Sensorprinzipien verfügen wie dargestellt über unterschiedliche Vor- und Nachteile. Neben dem Einsatz von Einzelsensordlösungen ist auch eine Fusion unterschiedlicher Sensortypen zur Plausibilisierung oder Ergänzung der mit einem Sensortyp gewonnenen Informationen möglich. Die folgende Analyse beschränkt sich auf die Betrachtung von Einzelsensordlösungen zur Deckung des erforderlichen Informationsbe-

¹⁸⁶ Noll et al. (2012): Ultraschallsensorik, S. 122

¹⁸⁷ Vgl. Kastner et al. (2011): Task-based environment interpretation and system architecture for next generation ADAS, S. 24

¹⁸⁸ Bei ungestörtem Empfang und günstiger Satellitenkonstellation ist eine Positionsbestimmung mit 10-20 m Genauigkeit möglich (Vgl. Kleine-Besten et al. (2012): Navigation und Telematik, S. 602)

¹⁸⁹ Eine Darstellung der technischen Grenzen und möglicher Optimierungsmaßnahmen hinsichtlich der Eignung für FAS-Anwendungen ist Jiminez et al. (2011): Limitations of positioning systems for developing digital maps and locating vehicles according to the specifications of future driver assistance systems zu entnehmen.

darfs, wobei von einer prinzipiellen Fusionierbarkeit der Sensortypen ausgegangen wird¹⁹⁰.

5.3.8 Zusammenfassung

Die Darstellung des Standes der Technik zeigt die Vielfalt unterschiedlicher Umfeldsensortypen und deren Anwendungsbereiche. In Tabelle 5-1 sind die Eigenschaften und Ausführungsvarianten heute am Markt verfügbarer Umfeldsensoren zusammenfassend aufgeführt.

Tabelle 5-1: Eigenschaften und Ausführungsvarianten verschiedener Sensorprinzipien sowie Eignungsbewertung (+: geeignet, -: nicht geeignet, ()): Einschränkung) basierend auf Stiller et al.¹⁹¹

		Radar	Lidar	Kamera	3D-ToF	Ultraschall
Sensorprinzip						
Primäre Messungen	Position	+	+	-	+	+
	Geschwindigkeit	+	-	-	-	-
	Helligkeitsmuster	-	+	+	+	-
Detektion von	Objekt	+	+	+	+	+
	Fußgänger/Fahrradfahrer	(+)	+	+	+	+
	Fahrbahnmarkierung	-	(+)	+	(+)	-
	Verkehrszeichen	-	-	+	-	-
	Lichtsignalanlage	-	-	+	-	-
	Borde	-	+	+	+	+
Kennwerte existierender Ausführungsvarianten						
Reichweite in m		30/60/250 (SR/MR/LR)	200	80	70	3
Azimut in °		120 /60/20(SR/MR/LR)	110	50	18	120
Elevation in ° ¹⁹²		13/4(SR/ LR)	3	20	52	70

¹⁹⁰ Darms (2007): Eine Basis-Systemarchitektur zur Sensordatenfusion von Umfeldsensoren für Fahrerassistenzsysteme

¹⁹¹ Stiller et al. (2012): Maschinelles Sehen, S. 220

¹⁹² Quellen: Winner (2012): Radarsensorik, S. 152-170; Ibeo Automotive (2013): ibeo Lux Salesblatt; Continental (2009): Datenblatt MFC 2 Kamera; Ringbeck et al. (2007): A 3D time of flight camera for object detection, S. 8 und Noll et al. (2012): Ultraschallsensorik, S. 117

5.4 Bewertung der technischen Realisierbarkeit

Die Zusammenführung der in Abschnitt 5.2 ermittelten Anforderungen an die maschinelle Umfelderkennung und der Leistungsfähigkeit des in Abschnitt 5.3 dargestellten Standes der Technik führt zu Abbildung 5-9. Hieraus zeigen sich die Grenzen hinsichtlich der technischen Realisierbarkeit des Gate-Konzepts.

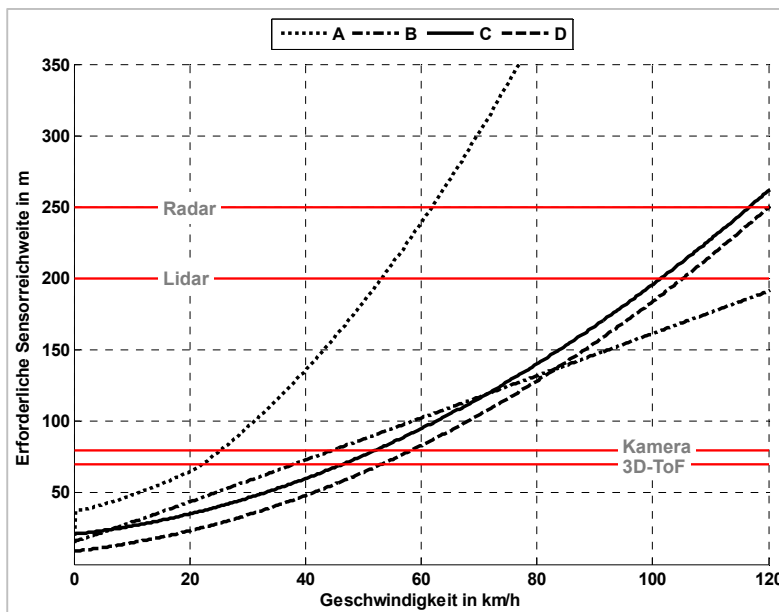


Abbildung 5-9: Gegenüberstellung der erforderlichen Sensorreichweiten mit den durch den Stand der Technik darstellbaren Reichweiten [A: Bewegte Objekte mit $v_{obj} = v_{ego}$ | B: Bewegte Objekte bei $v_{ego} = 0$ | C: Fußgänger, Radfahrer, Freiraum | D: Verkehrszeichen, Signalisierung, Fahrbahnmarkierung, Einmündungen, Borde, bauliche Begrenzungen]

Zur Deckung des aus dem Szeneriewissen abgeleiteten Informationsbedarfs (Linie D in Abbildung 5-9) ermöglichen 3D-ToF- und Kamerasysteme eine zuverlässige Detektion bis zu einer maximalen Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs von etwa 50-60 km/h, was dem Geschwindigkeitsbereich innerhalb geschlossener Ortschaften entspricht. Eine mit der Geschwindigkeit zunehmende erforderliche Reichweite bei der Annäherung an ein Gate kann für diesen Informationstyp nur durch erweiterte digitale Karten abgedeckt werden. Aufgrund der Nachteile dieser beiden Informationsquellen (Kamera: geringe Reichweite, Karte: Aktualität und Genauigkeit der Positionsbestimmung) bietet deren Kombination eine vielversprechende Lösung. So ermöglicht die digitale Karte eine erste Abschätzung der Entfernung zum Gate mit geringer Genauigkeit, die während der Gate-

Annäherung durch die Kameradaten erhöht wird¹⁹³. Zudem dienen die Kameradaten zur Plausibilisierung der Kartendaten. Im Falle der Fusion von Kamera und digitaler Karte ist weiterhin die Verwendung einer einfachen digitalen Karte ausreichend, da die Kameradaten den restlichen Informationsbedarf, wie beispielsweise die Position einer Lichtsignalanlage, abdecken. Nach Stein et al.¹⁹⁴ lässt sich der Fehler bei der Entfernungsmessung Δd mit einer Kamera aufgrund eines Fehlers von n Pixeln in Abhängigkeit der Entfernung d , der Kammerkonstante f und der Höhe der Kamera über der Fahrbahn H wie folgt berechnen:

$$\Delta d \approx \frac{nd^2}{fH} \quad (5.7)$$

Abbildung 5-10 zeigt den absoluten Fehler bei der Entfernungsmessung eines repräsentativen Kamerasystems¹⁹⁵ im Vergleich zu einem mit 10 m als konstant angenommenen Fehler bei der Positionsbestimmung mit GPS. Aus dieser theoretischen Betrachtung ergibt sich, dass die Entfernungsmessung mit einer Kamera ab einer Entfernung von etwa 100 m genauer ist, als mit GPS.

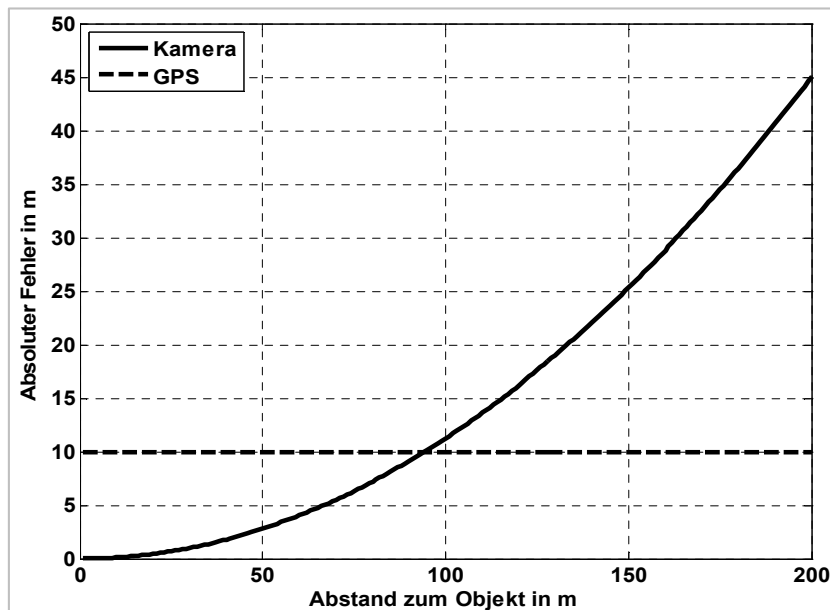


Abbildung 5-10: Absoluter Fehler bei der Entfernungsmessung in Abhängigkeit des Abstands zum Objekt für Kamerasysteme und GPS

¹⁹³ Die Eignung dieses Ansatzes für Kreuzungsszenarien zeigen beispielsweise Nedevschi et al. (2012): Accurate Ego-Vehicle Global Localization at Intersections Through Alignment of Visual Data With Digital Map

¹⁹⁴ Stein et al. (2003): Vision-based ACC with a Single Camera: Bounds on Range and Range Rate Accuracy

¹⁹⁵ Die Parameter der Kamera entsprechen $f=740$ Pixel (Auflösung von 640x480 mit einem horizontalen Blickfeld von 47°), $H=1,2$ m, $n=1$

Eine ähnliche Bewertung ergibt sich für die aus der Gate-Lokalisierung abgeleiteten Anforderungen (Linie D in Abbildung 5-9), wobei die digitale Karte nur wenige Informationen liefern kann. Die Lidar-Sensorik alleine ermöglicht eine Deckung des Informationsbedarfs bis etwa 100 km/h.

Ein Fehler in der Bestimmung der Entfernung zum Gate hat gemäß dem in Abschnitt 4.3.2 beschriebenen Regelverhalten Auswirkungen auf die Dauer der ersten Verzögerungsstufe Δt_{A1} und die Verzögerung D_2 in der zweiten Verzögerungsstufe. Diese Auswirkungen hängen von der Geschwindigkeit, dem damit verbundenen Abstand zum Gate bei Initiierung des Gate-Annäherungsmanövers sowie dem vom Abstand zum Gate abhängigen Fehler bei der Entfernungsmessung ab.

Für die Realisierung des Kontextwissens wird weiter zwischen den beiden Extrembetrachtungen unterschieden. Für den Fall, dass sich das Ego-Fahrzeug im Stillstand am Gate befindet, eignen sich von den heute am Markt verfügbaren Umfeldsensoren Radar und Lidar zur Detektion bewegter Objekte mit einer Geschwindigkeit von 100 km/h beziehungsweise 120 km/h (Linie B in Abbildung 5-9). Die Vorteile von Lidar-Sensoren bestehen in dem größeren Azimut, der die in Abbildung 5-5 dargestellten Abdeckungsbereiche und Reichweiten ermöglicht, sowie der besseren Detektion von Fußgängern und Fahrradfahrern (Linie C in Abbildung 5-9). Die größten Anforderungen stellt die Deckung des Informationsbedarfs vor Initiierung des Gate-Annäherungsmanövers dar. Wie bereits zuvor beschrieben, ist eine Abdeckung der Kreuzungszufahrten West und Ost aufgrund zunehmender Sichtbehinderungen in dieser frühen Phase nicht möglich. Jedoch stellt auch die Detektion der sich aus Richtung Norden der Kreuzung nähernden Fahrzeuge hohe Anforderungen an die maschinelle Umfelderkennung (Linie A in Abbildung 5-9). So ist die maximale Geschwindigkeit für das Ego-Fahrzeug und die sich der Kreuzung nähernden Verkehrsobjekte auf 50 km/h (Lidar) und 60 km/h (Radar) begrenzt.

Eine weitere Herausforderung stellt in beiden Fällen die Abdeckung des rechten Seitenbereichs neben dem Fahrzeug dar. Bekannte sogenannte 360°-Architekturen konzentrieren sich meist auf die Funktionsdarstellung eines automatisierten Fahrstreifenwechsels auf Autobahnen¹⁹⁶, was durch den Einsatz geeigneter Objekthypothesen keine Abdeckung des unmittelbaren seitlichen Fahrzeugumfelds erfordert. Letztere ist jedoch in innerstädtischen Szenarien, wie dem betrachteten Rechtsabbiegen an einer Kreuzung unerlässlich. Ultraschallsensoren sind aufgrund der geringen Reichweite alleine nicht geeignet. Die seitliche Positionierung einer Kamera oder eines Lidar-Sensors erscheint schwierig und im Falle des Lidar-Sensors aufgrund der geringen Elevation für eine

¹⁹⁶ Beispielhafte Architekturen sind Aeberhard et al. (2011): Object Existence Probability Fusion using Dempster-Shafer Theory in a High-Level Sensor Data Fusion Architecture oder Classen et al. (2012): Systemarchitektur für eine 360 Grad Fahrerassistenzsensorik zu entnehmen

flächendeckende Erfassung von beispielsweise Fahrradfahrern nicht ausreichend. Eine Lösung könnte die in Abschnitt 5.3.3 beschriebene Fusion mehrerer an der Fahrzeugseite positionierter Kameras oder eine in der Dachkante positionierte 3D-ToF-Lichtleiste bieten.

5.5 Fazit und Diskussion der Ergebnisse

Aus den Ergebnissen des vorherigen Abschnitts lassen sich hinsichtlich der technischen Realisierbarkeit des Gate-Konzepts bezüglich der zu erfüllenden Anforderungen an die maschinelle Umfeldwahrnehmung verschiedene Schlussfolgerungen ziehen. Die analytische Anforderungsermittlung sowie der Abgleich mit dem heutigen Stand der Technik zeigen, dass die Anforderungen zur Identifikation von Szenarien mit Entscheidungsbedarf (Szeneriewissen) und zur Bestimmung der Gate-Positionen (Gate-Lokalisierung) bis zu einer Geschwindigkeit von etwa 50 km/h (3-D-ToF-/Kamerasysteme) beziehungsweise 100 km/h (Lidarsensorik) möglich ist. Durch die Fusion von Umfeldsensorik mit digitalen Karten kann diese Reichweite über den e-horizon nahezu beliebig erweitert werden. Die grundlegenden technischen Anforderungen aller drei Automationsgrade können demnach mit dem heutigen Stand der Technik dargestellt werden. Deutlich höhere Anforderungen stellt hingegen das für die Systemausprägungen „Vorschlag“ und „Entscheidung“ erforderliche Kontextwissen dar. Die Extrembetrachtung, dass das Fahrzeug durch das automatisch initiierte Gate-Annäherungsmanöver am Gate zum Stehen gekommen ist, zeigt, dass die Anforderungen an die maschinelle Umfeldwahrnehmung bis zu einer Geschwindigkeit der anderen Verkehrsobjekte von 120 km/h erfüllt werden können. In Anbetracht der bereits erwähnten üblichen Beschränkung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit an Knotenpunkten außerhalb geschlossener Ortschaften auf 70 km/h, werden diese Anforderungen als durch den Stand der Technik ausreichend erfüllt betrachtet. Die Vermeidung eines automatisch initiierten Annäherungsmanövers und somit die rechtzeitige Deckung des Informationsbedarfs während der Annäherung an ein Gate ist durch den heutigen Stand der Technik hingegen nicht uneingeschränkt darstellbar. Dieser Fall erfordert eine Unterscheidung hinsichtlich des in Abhängigkeit der Vorfahrtsregelung zu deckenden Informationsbedarfs. So sind das Folgen der Vorfahrtsstraße sowie das Rechtsabbiegen¹⁹⁷ in eine untergeordnete Straße darstellbar. Die sich aus der Detektion entgegenkommender Fahrzeuge beim Linksabbiegen in eine untergeordnete Straße ergebenden Anforderungen an die Sensorreichwei-

¹⁹⁷ Im Bereich der Verkehrsplanung wird zwischen dem „Abbiegen“ und dem „Einbiegen“ unterschieden. Das Abbiegen beschreibt das Einfahren eines Fahrzeuges in eine untergeordnete Straße, das Einbiegen in eine übergeordnete Straße. Eine Fahrtrichtungsänderung auf eine Straße gleicher Kategorie wird ebenfalls als Einbiegen bezeichnet.

te sind bei gleicher Ausgangsgeschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs nur bis zu einer Geschwindigkeit von 60 km/h realisierbar. Eine Entscheidungsassistenz gemäß der Automationsgrade 2 und 3 ist demnach nur in innerstädtischen Szenarien oder bei einer entsprechenden Limitierung der Höchstgeschwindigkeit bei der Manöverausführung des Ego-Fahrzeugs realisierbar. Die Initiierung des Gate-Annäherungsmanövers ist für die Szenarien, in denen eine übergeordnete Straße gekreuzt oder in diese eingebogen wird, nicht vermeidbar, da eine Deckung des Informationsbedarfs in dieser frühen Annäherungsphase aufgrund von anzunehmenden Sichtverdeckungen nicht möglich ist. Dies gilt jedoch nicht nur für die maschinelle Umfeldwahrnehmung, sondern auch für den menschlichen Fahrer, da die durch die RASSt einzuhaltenen Sichtweiten¹⁹⁸ deutlich niedriger ausfallen. Demnach ergibt sich für die Bewältigung dieser Szenarien mit dem Gate-Konzept im Vergleich zur konventionellen Fahrzeugführung kein Unterschied.

Die Ergebnisse dieser Analyse basieren auf einer Worst-Case-Abschätzung und repräsentieren somit die höchstmöglichen Anforderungen. Eine wesentliche Rolle spielen dabei die getroffenen Annahmen hinsichtlich des von der Automation wahrzunehmenden Umfelds, der Leistungsfähigkeit der Automation (beispielsweise in Form der angenommenen Detektionsdauer) und den Fahrzeugparametern (beispielsweise die Beschleunigungsfähigkeit). Eine Änderung der genannten Einflussgrößen führt zu Änderungen hinsichtlich der ermittelten Anforderungen wie beispielsweise der Sensorreichweite und der Bewertung der technischen Realisierbarkeit beziehungsweise der Begrenzung auf einen Geschwindigkeitsbereich. Die grundlegende Bewertung der technischen Realisierbarkeit der unterschiedlichen Automationsgrade sowie der möglichen Nutzungskontexte ist hiervon jedoch nicht betroffen.

Abschließend ist anzumerken, dass eine Entscheidungsassistenz auch in den als technisch darstellbaren Szenarien aufgrund von Sichtverdeckungen nicht immer möglich ist. Hierzu zählen beispielsweise das tangential Linksabbiegen, bei dem die entgegenkommenden Fahrzeuge voreinander abbiegen oder die Sichtverdeckung an der Kreuzungseinfahrt durch ein auf dem benachbarten Fahrstreifen wartendes Fahrzeug. Gerade in diesen Szenarien wird jedoch der Vorteil des kooperativen Ansatzes von CbW gegenüber vollautomatisierten Fahrzeugführungskonzepten deutlich, da der Fahrer in den beschriebenen Szenarien jederzeit selbst die Entscheidung treffen kann und somit den Entscheidungsprozess der Automation verkürzt beziehungsweise ersetzt. Gleiches gilt für die mit dem heutigen Stand der Technik nicht darstellbaren Szenarien, wobei anzumerken ist, dass sich die heutigen Sensorausführungen an der Funktionsdarstellung heutiger FAS orientieren. Beispiele wie die Entwicklung eines Überholassistentensystems

¹⁹⁸ Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2006): Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen RASSt 06, Abschnitt 6.3.9.3 Sichtfelder, S. 124

durch Hohm zeigen die Möglichkeit spezifischer Anpassungen im Bereich der Sensor-konfiguration¹⁹⁹.

¹⁹⁹ Durch eine Softwareanpassung wurde die Reichweite eines serienmäßiges Radarsensors des Typs Continental ARS 300 von 200 m auf 400 m mit einer damit verbundenen Reduzierung der longitudinalen Auflösung erhöht (vgl. Hohm (2010): Umfeldklassifikation und Identifikation von Überholzielen für ein Überholassistentensystem, S. 75)

6 Evaluierung des Gate-Konzepts

Als letzter Schritt der funktionalen Betrachtung erfolgt eine Evaluierung des Gate-Konzepts in Form einer Untersuchung der Gebrauchstauglichkeit. Hierzu wird eine Studie mit 42 Probanden in einem statischen Fahr Simulator durchgeführt.

6.1 Untersuchungshypothesen

Die Untersuchungsziele der Probandenstudie gliedern sich in unterschiedliche Themenbereiche, die im Folgenden mit der Formulierung der Untersuchungshypothesen motiviert werden. Die erste grundlegende Fragestellung ist die der Gebrauchstauglichkeit des entwickelten Interaktionskonzepts. Die Gebrauchstauglichkeit ist nach DIN 66050 wie folgt definiert²⁰⁰:

“Die Gebrauchstauglichkeit eines Gutes ist dessen Eignung für seinen bestimmungsgemäßen Verwendungszweck, die auf objektiv und nicht objektiv feststellbaren Gebrauchseigenschaften beruht und deren Beurteilung sich aus individuellen Bedürfnissen ableitet.”

Der Begriff Gebrauchstauglichkeit, der häufig auch synonym mit den Begriffen „Benutzerfreundlichkeit“ oder „Usability“ verwendet wird²⁰¹, kann zudem auch Aspekte der Nutzerakzeptanz umfassen. Im Kontext dieser Arbeit handelt es sich bei der „Eignung für den bestimmungsgemäßen Verwendungszweck“ um die Anwendbarkeit des Gate-Konzepts durch die Probanden zur sicheren Absolvierbarkeit von repräsentativen Szenarien. Neben den drei möglichen Systemausprägungen wird hierbei zwischen dem szenariogerechten und dem nicht szenariogerechten Verhalten der Automation unterschieden. Szenariogerechtes Verhalten bedeutet, dass die Automation für das jeweilige Szenario richtige Vorschläge macht beziehungsweise richtige Entscheidungen trifft (beispielsweise Vorschlag der Automation das Gate zu passieren, falls dies auch sicher möglich ist). Bei der Bewertung von Sicherheit handelt es sich um eine stark subjektive Empfindung des Menschen²⁰². Zudem unterscheidet sich das Empfinden in einem Simulator von dem

²⁰⁰ DIN 66050 (1980): Gebrauchstauglichkeit

²⁰¹ Vgl. Schlick et al. (2010): Arbeitswissenschaft, S. 1064

²⁰² Vgl. Ausführungen in Abschnitt 2.2.2 zum subjektiven Risikoempfinden des Menschen

in einem realen Fahrzeug²⁰³. Aus diesem Grund erfolgt eine zweistufige Sicherheitsbewertung. Als eindeutiges und triviales Kriterium wird die Kollisionsfreiheit mit anderen Verkehrsteilnehmern gewählt. Zudem erfolgt für jeden Probanden die individuelle Bestimmung eines subjektiven Kritikalitätsmaßes. Die Gestaltung dieser Versuche und das Vorgehen zur Bestimmung des Kritikalitätsmaßes sind Abschnitt 6.4.3 zu entnehmen. Hieraus ergibt sich folgende Hypothese:

H 4 *Repräsentative Szenarien, in denen während der Manöverdurchführung ein zusätzlicher Entscheidungsbedarf bezüglich der Ausführbarkeit des Manövers besteht, sind mit dem Gate-Konzept und einer durch den Automationsgrad definierten Aufgabenverteilung zwischen Fahrer und Automation für den*

- *CbW-Automationsgrad 1 (Systemausprägung „Anzeige“)*
- *CbW-Automationsgrad 2 (Systemausprägung „Vorschlag“)*
- *CbW-Automationsgrad 3 (Systemausprägung „Entscheidung“)*

und für den Fall, dass sich die Automation

- *szenariogerecht verhält*
- *nicht szenariogerecht verhält*

sicher absolvierbar.

Die Teilhypothesen gelten als falsifiziert, falls gemäß den beschriebenen Bewertungskriterien unsichere Fahrsituationen aufgetreten sind. Da der Untersuchungsfokus primär auf der Konzeptbewertung liegt, handelt es sich bei der Ausgestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle²⁰⁴ um eine prototypische Lösung. Wie Abschnitt 6.3 zu entnehmen ist, wird hierbei zwar eine Reihe von Gestaltungsrichtlinien beachtet, dennoch existiert ein ergonomisches Optimierungspotential. Im Falle der Falsifikation von Teilhypothesen ist demnach zu untersuchen, ob der Grund für das Auftreten einer unsicheren Fahrsituation auf das falsche Handeln des Probanden, das Interaktionskonzept oder die Gestaltung der MMS zurückzuführen ist. Zu diesem Zweck werden die Probanden mit dem in Anhang E dargestellten Fragebogen zu den Ursachen befragt. Die Hypothese gilt dann als falsifiziert, wenn es sich um Gründe handelt, die auf das Gate-Konzept selbst zurückzuführen sind.

²⁰³ In einer Vergleichsstudie konnte nachgewiesen werden, dass Probanden in einem statischen Simulator niedrigere Zeitlücken zu anderen Verkehrsteilnehmern akzeptieren als bei vergleichbaren Szenarien in einem realen Fahrzeug (vgl. Meyer et al. (2003): Driver behavior during left turn - a field and a simulator experiment).

²⁰⁴ Im Folgenden mit MMS abgekürzt. Die Mensch-Maschine-Schnittstelle umfasst in diesem Kontext ein Bedien- und ein Anzeigeelement.

Der zweite Fokus dieser Studie richtet sich auf die für die Entscheidungsfindung bezüglich des Verhaltens am Gate erforderliche Zeit. Hierbei wird untersucht, ob die für die Entscheidungsfindung, die gemäß der Definition aus Abschnitt 2.2.2 die Schritte von der Perzeption bis zur Handlungsausführung umfasst, erforderliche Zeit abhängig vom Automationsgrad ist. Die Grundlage bildet die Annahme, dass der menschliche Fahrer die gleiche Zeit für das eigenständige Treffen einer Entscheidung wie für das Nachvollziehen einer Entscheidung der Automation benötigt. Die Betrachtung erfolgt für den Automationsgrad 1 (Fahrer trifft Entscheidung allein) und den Automationsgrad 2 (Fahrer trifft Entscheidung basierend auf einem Vorschlag der Automation). Der Vergleich zu dem höchsten Automationsgrad 3, bei dem die Automation die Entscheidung bezüglich der Gate-Passage selbst trifft, wird nicht untersucht, da sich der Zeitpunkt der impliziten Zustimmung durch den Fahrer nicht eindeutig feststellen lässt. Aufgrund der Sicherstellung der Vergleichbarkeit der Ausgangsbedingungen wird für diese Untersuchung nur das erste Gate herangezogen. Dies führt zu folgender Hypothese:

H 5 *Die Entscheidungszeit der Probanden unterscheidet sich nicht signifikant für den CbW-Automationsgrad 1 (Automation zeigt Gate an) und den CbW-Automationsgrad 2 (Automation zeigt Gate an und macht einen Vorschlag)*

Für den Fall, dass die Hypothese widerlegt werden kann, kann dieses Erkenntnis in zweierlei Hinsicht genutzt werden. Einerseits kann dieses Ergebnis als Grundlage für die automationsgradabhängige Parametrierung der Regelstrategie für das Gate-Annäherungsmanöver dienen. Andererseits lässt sich für den Fall, dass eine zunehmende Automatisierung zu einer längeren Entscheidungszeit führt, schlussfolgern, dass diese Art der Entscheidungsassistenz, entgegen der ursprünglichen Intention, nicht geeignet erscheint. Die Ergebnisse dieser Untersuchung werden zudem mit dem Subjektivurteil der Probanden verglichen.

Der dritte Untersuchungsfokus richtet sich auf die Fragestellung, ob die für die Korrektur einer nicht szenariogerechten Entscheidung der Automation bezüglich des Verhaltens am Gate erforderliche Zeit abhängig vom Automationsgrad ist. Entsprechend der zugrunde gelegten Annahme gilt, je schneller eine Fehlentscheidung der Automation durch die Probanden korrigiert wird, desto höher ist das erzielte Sicherheitsniveau²⁰⁵. Der Vergleich erfolgt für den Automationsgrad 2 (Automation macht einen Vorschlag) und den Automationsgrad 3 (Automation trifft Entscheidung eigenständig). Als Bewertungsgröße wird die Dauer zwischen der Anzeige des Vorschlags beziehungsweise der Entscheidung durch die Automation bis zum Zeitpunkt des Fahrereingriffs herangezogen. Aufgrund der Vergleichbarkeit der Ausgangsbedingungen wird für diese Untersuchung nur das erste Gate betrachtet. Dies führt zu folgender Hypothese:

²⁰⁵ Diese vereinfachende Annahme gilt nur in Szenarien, die aufgrund der Entscheidungsnotwendigkeit als kritisch einzustufen sind.

H 6 *Für den Fall eines nicht szenariogerechten Verhaltens der Automation unterscheidet sich die Reaktionszeit der Probanden nicht für den CbW-Automationsgrad 2 (Automation zeigt Gate an und macht einen Vorschlag) und den CbW-Automationsgrad 3 (Automation zeigt Gate an und trifft Entscheidung selbst).*

6.2 Untersuchungswerkzeug

Als Untersuchungswerkzeug für die Evaluierung des entwickelten Interaktionskonzepts dient ein statischer Fahrsimulator. Der Simulator ermöglicht die Untersuchung der grundlegenden, in dem vorherigen Abschnitt formulierten, Hypothesen in Kombination mit einer Befragung der Probanden. Der Vorteil des Simulators gegenüber einem realen Versuchsfahrzeug besteht in der sicheren, kontrollierbaren und reproduzierbaren Durchführung von Probandenstudien und in der einfacheren prototypischen Realisierung des Interaktionskonzepts in dieser frühen Entwicklungsphase. Diese Versuchsmethodik hat sich zudem auch bei anderen Untersuchungen im Bereich der Entwicklung von Assistenzkonzepten bewährt²⁰⁶.

Der statische Fahrsimulator führt jedoch zu einer Reihe negativer Effekte, die insbesondere auf die fehlende kinästhetische Rückmeldung und die virtuelle Darstellung des Umfelds zurückzuführen sind. Bei der Integration des Gate-Konzepts und bei der Versuchsplanung werden die negativen Auswirkungen auf die Einschätzung von Beschleunigungen, Geschwindigkeiten und Abständen sowie das Phänomen der Simulatorkrankheit berücksichtigt. Die Gründe für das Auftreten der Simulatorkrankheit, die sich bei Probanden durch Symptome wie Kopfschmerzen, Schwindel, Übelkeit, oder Brechreiz äußern, sind wissenschaftlich noch nicht eindeutig geklärt²⁰⁷. Das am meisten verbreitete Erklärungsmodell ist die „Sensory rearrangement theory“ von Reason²⁰⁸, gemäß der es aufgrund der Diskrepanz zwischen der optisch wahrgenommenen und der kinästhetisch erlebten Bewegung in einem Simulator zu einer Irritation der Sinnesorgane kommen kann, die zu den beschriebenen Symptomen führt. Die in dieser Studie getroffenen Maßnahmen zur Kompensation beziehungsweise Linderung der beschriebenen negativen Effekte eines statischen Fahrsimulators werden in den entsprechenden Abschnitten beschrieben.

²⁰⁶ Vgl. beispielsweise Bengler et al. (2011): Von H-Mode zur kooperativen Fahrzeugführung - Grundlegende ergonomische Fragestellungen

²⁰⁷ Einen Überblick über wissenschaftliche Theorien und Untersuchungen geben Hoffmann et al. (2006): Darstellung und Evaluation eines Trainings zum Fahren in der Fahrsimulation

²⁰⁸ Reason (1978): Motion sickness adaptation: a neural mismatch model

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 6-1 dargestellt. Der Aufbau besteht aus einer Sitzkiste, deren ergonomische Gestaltung sich an den Maßen eines realen Fahrzeugs orientiert²⁰⁹. Die Darstellung des Fahrzeugumfelds und des in Abschnitt 6.3.2 beschriebenen Anzeigeelements in Form eines kontaktanalogen Head-up-Displays erfolgt über drei Beamer. Durch die in Abbildung 6-1 skizzierte Anordnung wird ein Sichtfeld von 150° erzielt²¹⁰. Der Aufbau der Sitzkiste besteht im Rahmen dieser Untersuchung aus einem Pkw-Sitz, einem Lenkrad²¹¹ und dem für die Entscheidungs-Interaktion erforderlichen und in Abschnitt 6.3.3 beschriebenen Bedienelement. Die Bedienung der Simulationstechnik erfolgt über den rechts hinter der Sitzkiste und damit außerhalb des Blickfelds des Probanden liegenden Kommandostand des Versuchsleiters.

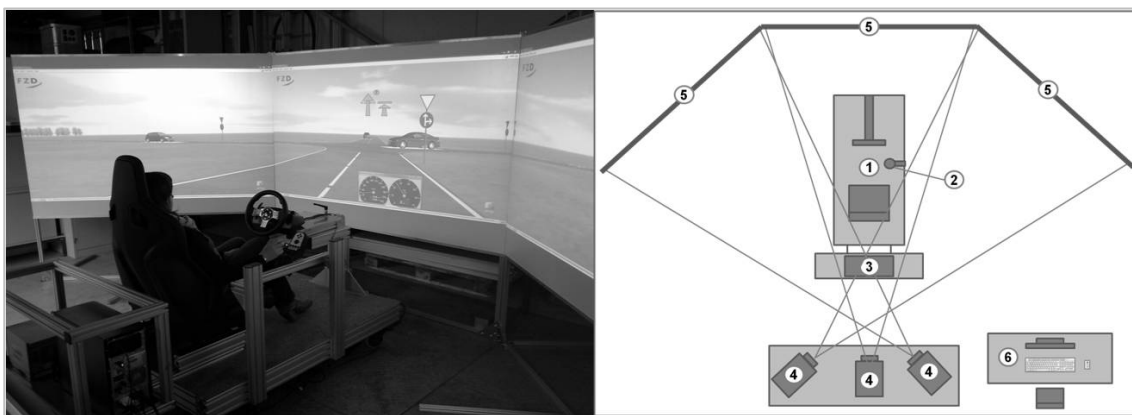


Abbildung 6-1: Versuchsaufbau im statischen Fahrsimulator [1: Sitzkiste, 2: Bedienelement, 3: Simulationsrechner, 4: Beamer, 5: Projektionsfläche, 6: Kommandostand des Versuchsleiters]

6.3 Integration des Gate-Konzepts

6.3.1 Softwaretechnische Realisierung

Die softwaretechnische Realisierung erfolgt mit der Fahrzeugsimulationssoftware IPG CarMaker. Diese bietet über eine entsprechende Schnittstelle die Möglichkeit, den in Matlab/Simulink entwickelten Funktionsumfang der CbW-Automation zu integrieren.

²⁰⁹ Die Gestaltungsrundlage bilden die Innenraumabmessungen eines BMW 5er Touring (E61), Baujahr 2008.

²¹⁰ Basierend auf Untersuchungen zum Einfluss des Sichtfelds des Simulatorenaufbaus im Hinblick auf die Validität von Simulatorstudien im Vergleich zu realen Fahrversuchen wird ein minimales Sichtfeld von 120° empfohlen (vgl. Jamson (2000): Driving Simulation validity: Issues of Field of View and Resolution).

²¹¹ Das Lenkrad dient einzig zur Herstellung eines Bezugs zu einem herkömmlichen Pkw und verfügt über keine Funktion.

Die Simulation des fahrdynamischen Verhaltens basiert dabei auf einem parametrierbaren und validierten Fahrzeug-, Fahrer- und Straßenmodell. Die Umfelddarstellung erfolgt über sogenannte statische „RoadObjects“ und dynamische „TrafficObjects“ mit parametrierbarem Verhalten. Die Visualisierung ist über drei, auf die drei Projektionsflächen aufgeteilten und zueinander zeitsynchronisierten, „Movies“ realisiert. Die Funktion des „TestManagers“ bietet die Möglichkeit den entwickelten Versuchsplan zu integrieren und die Versuchsszenarien automatisiert zu parametrieren und auszuführen. CarMaker bietet zudem die Möglichkeit, die Simulationsdaten aufzuzeichnen und für die Auswertung in Matlab zu exportieren. Durch eine leistungsstarke Hardware-Konfiguration wird eine Simulation und Visualisierung in Echtzeit bei einer gleichzeitigen Datenaufzeichnungsfrequenz von 20 Hz ermöglicht.

Die regelungstechnische Umsetzung des Funktionsumfangs basiert auf der von Hakuli et al.²¹² entwickelten Basisarchitektur und den in Abschnitt 4.3.2 beschriebenen Erweiterungen. Zudem wird der CarMaker-Funktionsumfang um ein frei parametrierbares, ideales Umfeldsensormodell ergänzt. Dieses ermöglicht die Definition des Sensorsichtbereichs durch Konfiguration von rechteckigen oder strahlenförmigen Flächen, innerhalb derer andere Objekte von der CbW-Automation erkannt werden. Zudem lässt sich der in Abschnitt 4.1.3 eingeführte Sicherheitskorridor als Grundlage für die Entscheidungsfindung bezüglich der Gate-Passage definieren. Als zusätzliche Ergänzung wird ein Gate-Modell integriert. Dieses ermöglicht die Definition der Anzahl, der Positionierung und des zugewiesenen Informationsbedarfs der in den Versuchsszenarien zu passierenden Gates. Die beiden Erweiterungen sind in der C-Umgebung von IPG CarMaker realisiert. Die Parametrierung dieser Funktionen erfolgt über die in Abbildung 6-2 dargestellte und in der Programmiersprache Tcl realisierte graphische Benutzeroberfläche.

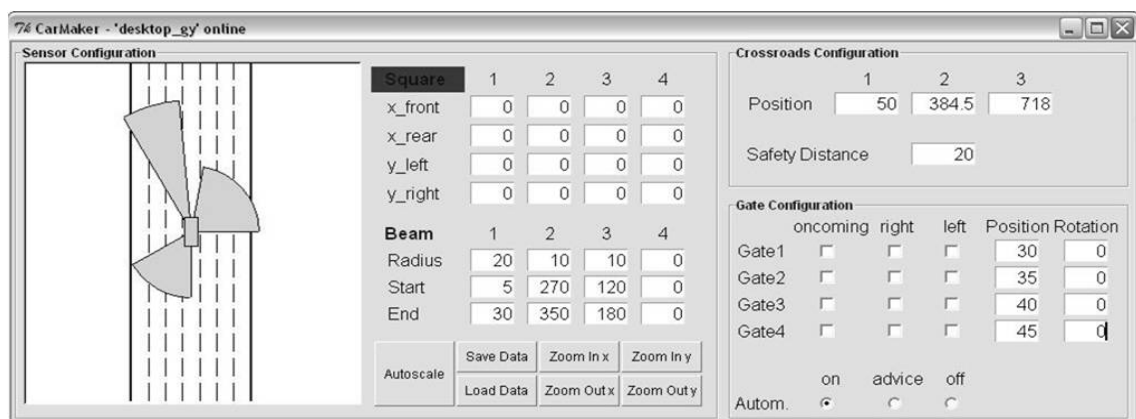


Abbildung 6-2: Graphische Benutzeroberfläche zur Sensor- und Gate-Konfiguration

²¹² Hakuli et al. (2010): Development and Validation of Manoeuvre-Based Driver Assistance Functions for Conduct-by-Wire with IPG CarMaker

6.3.2 MMS-Entwicklung: Anzeigeelement

Im Rahmen der Integration des Gate-Konzepts in den Fahr Simulator erfolgt eine prototypische Entwicklung eines Anzeigeelements. Die zwei primären Funktionen bestehen in der Visualisierung der Entscheidungsassistenz in Abhängigkeit des Automationsgrades sowie der Position der zu passierenden Gates.

Als Anzeigeelement wird ein kontaktanaloges Head-up-Display²¹³ gewählt. Dieses stellt die Informationen im Gegensatz zu den herkömmlichen im Automobilbereich eingesetzten Head-up-Displays (HuD) nicht statisch in einer konstanten Position, sondern in allen Raumrichtungen dynamisch, beziehungsweise umweltfest dar. Dies ermöglicht eine Ergänzung der Realität durch virtuelle Informationen. Dieses Anzeigekonzept hat sich bereits in ergonomischen Untersuchungen zu CbW bewährt²¹⁴. Die Funktion eines kontaktanalogen HuD wird in dem beschriebenen Simulatorenbau durch eine Erweiterung der Movie-Funktion von CarMaker realisiert. Die im Folgenden dargestellte Lösung ist das Ergebnis mehrerer Expertenworkshops unter Einbeziehung grundlegender Gestaltungsrichtlinien²¹⁵ und einer Optimierung im Anschluss an eine Stichversuchsreihe mit Versuchspersonen.

Die für die drei untersuchten Systemausprägungen entwickelte Anzeige für die Entscheidungsassistenz ist in Abbildung 6-3 für das Beispiel eines Linksabbiegemanövers dargestellt. Für die Symbole wird eine zweifarbige Darstellung (grau/orange) gewählt. Der Anzeige des aktivierten Manövers folgt die Anzeige der Entscheidungsassistenz für das nächste Gate in Abhängigkeit des Automationsgrades. Im Falle des Automationsgrades 1 werden dem Fahrer die beiden Entscheidungsalternativen „Gate passieren“ und „Anhalten am Gate“ zusammen mit einer durch ein Fragezeichen symbolisierten Entscheidungsaufforderung angezeigt. Die Anzeige der Entscheidungsalternativen ist eine Kombination des Manöversymbols und einem als Haltelinie symbolisierten Gate. Die Linie ist gemäß den Gestaltungsrichtlinien für Straßenmarkierungen unterbrochen (Gate passieren) oder durchgehend (Am Gate anhalten)²¹⁶. Nach erfolgter Ent-

²¹³ Die Untersuchung einer prototypischen Umsetzung eines kontaktanalogen Head-up-Displays in einem Versuchsfahrzeug findet sich in Schneid (2009): Entwicklung und Erprobung eines kontaktanalogen Head-up-Displays im Fahrzeug. Die Beschreibung einer technischen Umsetzung mittels Laserprojektion findet sich in Herzog et al. (2008): Laserprojektion.

²¹⁴ Franz et al. (2011): Konzeption eines kontaktanalogen Head-up-Displays für Fahrerassistenzsysteme am Beispiel Conduct-by-Wire

²¹⁵ Einen Überblick gibt König (2012): Nutzergerechte Entwicklung der Mensch-Maschine-Interaktion von Fahrerassistenzsystemen

²¹⁶ Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (1993): Richtlinien für Markierung von Straßen RMS, Abschnitt 2.1.2 Markierungszeichen, S. 4

scheidung durch den Fahrer wird das jeweilige Symbol entsprechend dem weiteren Verlauf der Manöverausführung orange gefüllt. So wird das Symbol für den Fall „Gate passieren“ vollständig und für den Fall „am Gate anhalten“ nur bis zu und einschließlich der Linie gefüllt. Dem Fahrer wird zudem weiterhin die Entscheidungsalternative in grau angezeigt. Im Falle des Automationsgrades 2 werden dem Fahrer die beiden Entscheidungsalternativen angezeigt, wobei die von der Automation vorgeschlagene Alternative durch ein oranges Fragezeichen markiert wird. Zusätzlich wird das Manöversymbol bis zu der symbolisierten Haltelinie orange gefüllt. Dies symbolisiert die im aktuellen Zustand, ohne erfolgte Entscheidung des Fahrers, zurückgelegte Trajektorie eines automatisch initiierten Gate-Annäherungsmanövers. Je nach Entscheidung des Fahrers erfolgt die zu Automationsgrad 1 identische Anzeige der erfolgten Entscheidung. Im Falle des Automationsgrades 3 trifft die Automation die Entscheidung zum Passieren des Gates eigenständig oder macht dem Fahrer einen Vorschlag zum Anhalten am Gate. Beide Anzeigen entsprechen der zuvor beschriebenen Gestaltung.

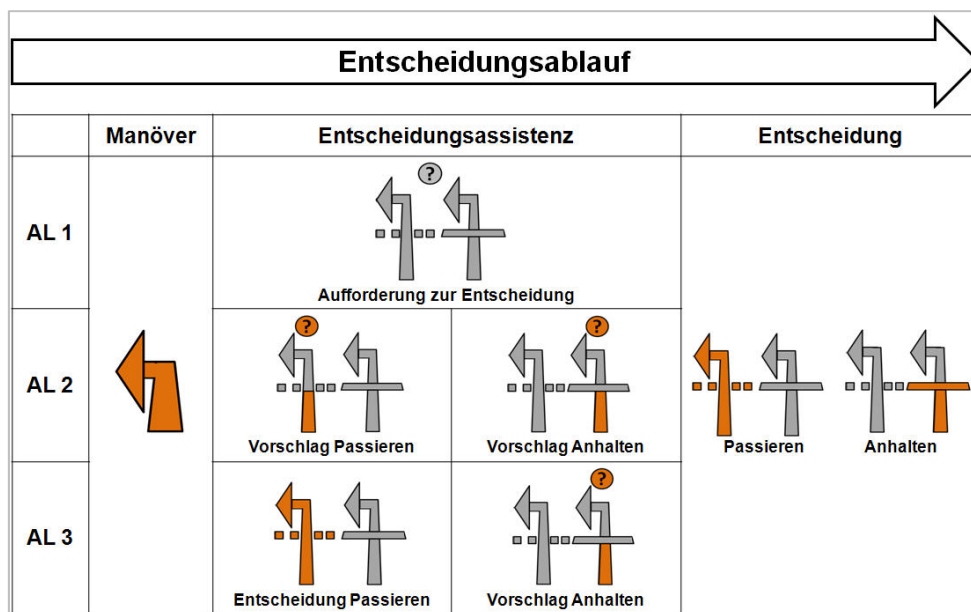


Abbildung 6-3: Anzeige der Entscheidungsassistenz im HuD am Beispiel eines Linksabbiege- manövers

Die Gate-Position wird über das kontaktanaloge HuD als eine weiße durchgezogene Linie auf der Fahrbahn, identisch zu der Markierung einer Haltlinie an einem Stopp-Schild²¹⁷, angezeigt.

Neben den beiden beschriebenen Funktionen wird das kontaktanaloge HuD für die Anzeige weiterer Informationen genutzt. Erstere ist die Unterstützung des Probanden

²¹⁷ Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (1993): Richtlinien für Markierung von Straßen RMS, Abschnitt 4.6 Haltlinien, S. 14

bei der Einschätzung von Geschwindigkeiten und Beschleunigungen in dem statischen Fahrsimulator. Die in dieser Arbeit realisierte Signalverzögerung der Gate-Annäherungsfunktion basiert auf einer zweistufigen Geschwindigkeitsreduktion mit unterschiedlicher Verzögerung, die von dem Probanden aufgrund der fehlenden kinästhetischen Rückmeldung einzig durch visuelle Reize und somit zeitverzögert wahrgenommen wird²¹⁸. Aus der Literatur sind unterschiedliche Maßnahmen zur Kompensation dieses negativen Effekts bekannt. So untersuchen beispielsweise Godley et al.²¹⁹ den Einsatz von „Rumble strips“ und Greenberg et al.²²⁰ den Einsatz eines Folgefahrzeugs auf die Einschätzung von Geschwindigkeit und Beschleunigung. Beide Maßnahmen stellen für die Untersuchung des Gate-Konzepts keine favorisierten Lösungen dar, da sie das Annäherungsverhalten beeinflussen. Im Rahmen dieser Studie wird daher ein anderer Ansatz zur Unterstützung des Probanden bei der Einschätzung der Verzögerung gewählt. Bei Auslösen der ersten Verzögerungsstufe des Gate-Annäherungsmanövers ändert die die Gate-Position markierende Haltelinie die Farbe von weiß zu rot. Bei Auslösen der zweiten Verzögerungsstufe wechselt zudem der Hintergrund des Tachometers, der über die CarMaker-Funktion „Instruments“ visualisiert wird, die Farbe von grau zu rot.

Zudem wechselt die Darstellung der Gate-Linie von einer durchgezogenen, je nach Annäherungsphase weißen oder roten, Haltelinie zu einer grünen, gestrichelten Linie sobald der Fahrer oder die Automation entscheiden, das nächste Gate zu passieren. Hierbei handelt es sich demnach um eine zu der zuvor beschriebenen und in Abbildung 6-3 dargestellten Anzeige der Entscheidungsassistenz redundante Information.

Als letzte Information werden die Fahrzeuge, die von der Automation über die maschinelle Umfelderkennung erkannt werden, durch einen gelben Schatten unter den Fahrzeugen gekennzeichnet. Dies soll es dem Proband ermöglichen, die szenariogerechten und nicht szenariogerechten Entscheidungen der Automation nachzuvollziehen beziehungsweise abzusichern. Die realisierte Funktion des kontaktanalogen HuD in der Simulatorumgebung ist in Abbildung 6-4 dargestellt.

²¹⁸ Eine Untersuchung dieses Effekts im Vergleich zu einer Fahrt in einem realen Fahrzeug und in einem dynamischen Fahrsimulator findet sich in Reymond et al. (2001): Role of Lateral Acceleration in Curve Driving: Driver Model and Experiments on a Real Vehicle and a Driving Simulator.

²¹⁹ Godley et al. (2002): Driving simulator validation for speed research

²²⁰ Greenberg et al. (2006): The validity of last-second braking and steering judgments in advanced driving simulators



Abbildung 6-4: Informationsdarstellung über das kontaktanaloge Head-up-Display

6.3.3 MMS-Entwicklung: Bedienelement

Die Entwicklung geeigneter Bedienelemente, die eine kooperative Interaktion zwischen Fahrer und Automation ermöglichen, stellt derzeit einen bedeutenden Forschungsschwerpunkt im Bereich der teilautomatisierten, kooperativen Fahrzeugführung dar²²¹. Im Rahmen dieser ersten Konzeptevaluierung, in der die Fahreraufgabe auf die Gate-Entscheidung beschränkt ist²²², kommuniziert der Proband seine Entscheidung über einen in seiner Funktion veränderten Gangwahlhebel. Durch Betätigen des Hebels nach vorne wird das nächste Gate passiert, eine Bewegung nach hinten führt entsprechend zum Anhalten. Die Probanden haben zu jedem Zeitpunkt die Möglichkeit, die getroffene Entscheidung durch Bewegung des Bedienelements in die entgegengesetzte Richtung zu korrigieren. Zudem kann die Freigabe für mehrere aufeinander folgende Gates durch mehrmaliges Betätigen des Bedienelements erteilt werden.

²²¹ Vgl. Abschnitt 1.3

²²² Vgl. Abschnitt 6.4.4

6.4 Versuchsdesign

6.4.1 Probandenkollektiv

Bezüglich der Aussagekraft von Probandenversuchen empfiehlt Bubb²²³ die Bestimmung der Mindestgröße eines Probandenkollektivs n in Abhängigkeit der Merkmale k und deren Ausprägungen N_i unter Berücksichtigung eines Sicherheitsfaktors SF (im Bereich von 3 bis 10), um die Anforderungen an eine statistische Auswertung von Untergruppen zu ermöglichen gemäß:

$$n \geq SF \cdot \prod_{i=1}^k N_i \quad (6.1)$$

Zudem ist eine Mindestanzahl von 30 Probanden für die zulässige Annahme einer Normalverteilung des Mittelwerts der Mittelwerte als Grundlage für die Anwendbarkeit einer Reihe statistischer Tests anzustreben²²⁴. Nach Fastenmeier²²⁵ stellen die wesentlichen Einflussgrößen auf das Verhalten im Straßenverkehr das Alter, die Dauer des Führerscheinbesitzes und die Fahrpraxis dar. Im Rahmen dieser Studie, in der ein Interaktionskonzept evaluiert wird, das sich von der konventionellen Fahrzeugführung deutlich unterscheidet, werden die Merkmale Führerscheinbesitz und Fahrpraxis nicht herangezogen. Hingegen wird ein Einfluss der Eigenschaften Geschlecht und Technikaffinität auf das Untersuchungsergebnis erwartet. Diese Merkmale werden im Folgenden näher erläutert.

Der Einfluss des Alters auf die Fahrleistungen von Fahrern ist, insbesondere in einer alternden Gesellschaft, immer wieder Thema in der öffentlichen Diskussion und Schwerpunkt wissenschaftlicher Untersuchungen. Fastenmeier et al. untersuchen die Unterschiede im Fahrerverhalten jüngerer und älterer Fahrzeugführer²²⁶. So weisen jüngere Fahrer aufgrund ihrer noch geringen Fahrerfahrung ein hohes Unfallrisiko auf. Gemäß dem in Abschnitt 1.1 beschriebenen Drei-Ebenen-Modell nach Rasmussen entwickelt sich das Verhalten erst mit der Zeit vom regelbasierten zum fertigkeitbasierten Verhalten. Ältere Fahrer verfügen hingegen über ein breiteres Repertoire an Verhal-

²²³ Bubb (2003): Wie viele Probanden braucht man für allgemeine Erkenntnisse aus Fahrversuchen?, S. 27

²²⁴ Bubb (2003): Wie viele Probanden braucht man für allgemeine Erkenntnisse aus Fahrversuchen?, S. 38

²²⁵ Fastenmeier (1995): Situationsspezifisches Fahrverhalten und Informationsbedarf verschiedener Fahrergruppen, S. 146

²²⁶ Fastenmeier et al. (2005): Anforderungsgerechtes Autofahren: wie zuverlässig sind jüngere und ältere Autofahrer?

tensmustern, auch für kritische Fahrsituationen, weisen jedoch geringere körperliche Fähigkeiten, wie reduziertes Hör- oder Sehvermögen, auf. Diese Unterschiede zeigen sich insbesondere im Fahrsimulator und im Bezug auf die Entscheidungsfindung in unterschiedlichen Verkehrsszenarien. So werden von Cassavaugh et al.²²⁷, Edwards et al.²²⁸ und Owens et al.²²⁹ in voneinander unabhängigen Studien signifikante Unterschiede zwischen jüngeren und älteren Fahrern im Fahrsimulator nachgewiesen. Basierend auf den jeweiligen Untersuchungen lässt sich jedoch, nicht zuletzt aufgrund der unterschiedlichen Zusammenstellung des Probandenkollektivs in den jeweiligen Untersuchungen, keine eindeutige Altersgrenze festlegen. So vergleichen beispielsweise Cassavaugh et al. die Altersgruppen 18-24 Jahre und 61-80 Jahre und Edwards et al. die Gruppen 19-22 Jahre und 65-83 Jahre. In anderen Studien im öffentlichen Straßenverkehr, wie beispielsweise der Untersuchung zu Abstandsregelsystemen von Abendroth, wird ein altersbedingter Unterschied in der Altersgruppe 45-50 Jahre nachgewiesen²³⁰. Im Rahmen dieser Untersuchung werden daher zwei Altersgruppen „jünger“ (18-40 Jahre) und „älter“ (>50 Jahre) festgelegt.

Die Wahl des Geschlechts als Merkmal für die Zusammensetzung des Probandenkollektivs beruht auf den wissenschaftlich untersuchten Unterschieden bezüglich der Raumvorstellungsfähigkeit²³¹. Die Einschätzung des Verhaltens anderer Verkehrsteilnehmer in Bezug auf das Verhalten des Ego-Fahrzeugs stellt in den in Abschnitt 6.4.2 beschriebenen Versuchsszenarien erhöhte Anforderungen an die Raumvorstellungsfähigkeit dar, so dass eine Unterscheidung des Geschlechts einen Einfluss auf die Untersuchungsergebnisse erwarten lässt.

Neben diesen beiden Kriterien wird zusätzlich die Technikaffinität der Probanden betrachtet. Gerade im Falle dieser Studie, in der die konventionelle Fahrzeugführung durch ein teilautomatisiertes Interaktionskonzept ersetzt wird, ist davon auszugehen, dass die Technikaffinität beziehungsweise die Aufgeschlossenheit gegenüber der Nutzung technischer Produkte einen entscheidenden Einfluss auf die Konzeptbewertung haben wird. Im Gegensatz zu den Merkmalen Alter und Geschlecht, die im Vorhinein

²²⁷ Cassavaugh et al. (2003): The effect of age on decision making during unprotected turns across oncoming traffic

²²⁸ Edwards et al. (2003): Older and younger driver performance at complex intersections: implications for using perception-response time and driving simulation

²²⁹ Owens et al. (2001): The effects of age and distraction on reaction time in a driving simulator

²³⁰ Abendroth (2001): Gestaltungspotentiale für ein PKW-Abstandsregelsystem unter Berücksichtigung verschiedener Fahrertypen, S. 116

²³¹ Eine Übersicht zu wissenschaftlichen Studien und Erklärungsmodellen zu geschlechtsspezifischen Unterschieden des räumlichen Vorstellungsvermögens findet sich in Quaiser-Pohl et al. (2007): Warum Frauen glauben, sie könnten nicht einparken - und Männer ihnen Recht geben

abgefragt und bei der Auswahl der Probanden berücksichtigt werden können, erfolgt die Bestimmung der Technikaffinität basierend auf einer von Habenicht entwickelten Methode²³². Die Technikaffinität wird vor Versuchsbeginn mittels acht Aussagen ermittelt, zu denen der Proband seine Zustimmung auf einer sechsstufigen Ordinalskala angeben kann. Im Gegensatz zu Habenicht wird nicht der Median aller Antworten als Maß für die Technikaffinität herangezogen, sondern die Anzahl der als technikaffin zu bewertenden Antworten²³³. Zudem wird die Skala von Habenicht²³⁴ leicht modifiziert. So wird die Anzahl der Aussagen von acht auf sieben reduziert, was, gemäß dem beschriebenen Vorgehen, eine eindeutige Bestimmung der Technikaffinität ermöglicht. Darüber hinaus beziehen sich alle Formulierungen der Aussagen auf den Probanden und folgen einer einheitlichen Antwortskala. Die im Rahmen dieser Studie verwendeten Aussagen sowie die Antwortskala sind Anhang E.2.1 zu entnehmen.

Die Verteilung der 42 Probanden, die an dieser Studie teilgenommen haben und die bei der Auswertung der Versuche berücksichtigt wurden, auf die ausgewählten Merkmale ist Tabelle 6-1 zu entnehmen.

Tabelle 6-1: Verteilung des Probandenkollektivs

Probandenkollektiv	42							
Geschlecht	Männlich 25				Weiblich 17			
Alter	Jünger 15		Älter 10		Jünger 9		Älter 8	
Technikaffinität	Ja 14	Nein 1	Ja 10	Nein 0	Ja 9	Nein 0	Ja 8	Nein 0

Das Probandenkollektiv verteilt sich auf 25 männliche und 17 weibliche Probanden, wobei die Altersspreizung von 20-69 Jahre (männliche Probanden) und von 22-59 Jahre (weibliche Probanden) reicht. Hinsichtlich der ermittelten Technikaffinität zeigt sich, dass bei allen teilnehmenden Probanden, mit Ausnahme eines jüngeren, männlichen Probanden, eine Technikaffinität angenommen werden kann. Dies ist vermutlich auf die Bereitschaft zur Teilnahme an einer wissenschaftlichen Untersuchung in einem Fahr Simulator zurückzuführen, die ein gewisses Technikinteresse voraussetzt. Dieses Merkmal

²³² Habenicht (2012): Entwicklung und Evaluation eines manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenten, S.71

²³³ Eine Antwort „Stimme voll und ganz zu“, „Stimme zu“, oder „Stimme weitestgehend zu“ gilt als technikaffin.

²³⁴ Habenicht (2012): Entwicklung und Evaluation eines manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenten, S.106

eignet sich somit nicht für die Bildung einer eigenen Untersuchungsgruppe. Demnach ergibt sich für das Probandenkollektiv mit zwei Merkmalsausprägungen nach Formel (6.1) die Anforderung nach einer Mindestprobandenzahl von $2 \cdot 2 \cdot 3 = 12$ Probanden. Diese rechnerische und die statistisch begründete Mindestzahl von 30 Probanden sind demnach durch das Kollektiv von 42 Probanden erfüllt. Vor der Auswahl der an der Studie teilnehmenden Probanden wurde zudem erfragt, ob Sehschwächen wie zum Beispiel eine Rot-Grün-Blindheit, eine Rot-Grün-Sehschwäche oder eine erhöhte Blendempfindlichkeit vorliegen. Personen, die diese Frage positiv beantworteten, wurden von der Teilnahme ausgeschlossen, da ein Einfluss auf die Bewertung des Anzeige-konzepts zu erwarten ist. Ebenso wurden Personen im Hinblick auf die Simulator-krankheit von der Teilnahme ausgeschlossen, die angaben, häufiger unter der Reise-krankheit zu leiden. Abschließend wurden die Probanden vor Beginn des Versuchs zu ihren Freizeitgewohnheiten bezüglich Spielen am PC oder auf der Spielekonsole befragt. Probanden, die angaben, dass sie regelmäßig, mehrmals die Woche Spiele des Genres Autorennsimulation mit Lenkrad und Pedalerie spielen, wurden bei der Auswertung nicht berücksichtigt. Der Grund hierfür liegt in der Annahme von die Untersu-chungsergebnisse beeinflussenden Fertigkeiten im Umgang mit dem verwendeten Be-dienelement sowie der Visualisierung des Fahrzeugumfelds. Die 42, in der Auswertung der Versuche berücksichtigten Probanden erfüllten keines der genannten Kriterien, das zu einem Ausschluss von der Teilnahme geführt hätte.

6.4.2 Versuchsszenarien

Die Auswahl der Versuchsszenarien basiert auf der in Abschnitt 3.2.1 durchgeführten Gate-Identifikation und der Analyse des Informationsbedarfs. Hierbei soll es sich um möglichst komplexe Szenarien handeln, bei denen während der Manöverausführung eine Folge mehrerer Gates zu passieren ist. Szenarien, die von dem Probanden für die Entscheidungsfindung die Berücksichtigung von sich von hinten nähernden Verkehrs-teilnehmern erfordert²³⁵, sind aufgrund des beschriebenen Simulatoreaufbaus mit einem Sichtfeld von 150° nicht geeignet. Für diese Simulatorstudie werden daher zwei Szena-rientypen ausgewählt. In beiden Szenariotypen nähert sich das Ego-Fahrzeug einer X-Kreuzung auf einer niederrangigen Zufahrt mit der Regelung „Vorfahrt achten“. In dem ersten Szenariotyp passiert das Ego-Fahrzeug die Kreuzung, in dem zweiten Typ biegt das Ego-Fahrzeug an der Kreuzung links ab. Die geometrische Gestaltung der Szenerie basiert auf der durchschnittlichen Fahrstreifenbreite von 3,5 m und dem durchschnittli-

²³⁵ Beispielsweise die Szenarien „Rechtsabbiegen an einer Kreuzung“ oder „Passieren eines Sonderfahr-streifens“

chen Radius der Eckausrundungen an Kreuzungen von 10 m gemäß der RAS²³⁶. Die Kreuzungszufahrten sind einstreifig ausgeführt und schneiden sich in einem rechten Winkel. Bei der Gestaltung der Szenarien wird weiter unterschieden, ob eine Manöverausführung ohne Anhalten am Gate möglich ist. Da die Akzeptanz von beziehungsweise das Vertrauen der Probanden in die Entscheidungen der Automation nicht Gegenstand dieser Untersuchung sind, erfolgt eine eindeutige Gestaltung der Szenarien. So führen Szenarien, die eine Unterbrechung der Manöverausführung am Gate erfordern, im Falle einer gegensätzlichen Entscheidung zu einer Kollision des Ego-Fahrzeugs mit anderen Verkehrsteilnehmern. Im Sinne einer erhöhten Entscheidungskomplexität nähern sich die anderen Verkehrsteilnehmer in diesen Szenarien immer aus mehreren Zufahrtrichtungen. Die Geschwindigkeit für das Ego-Fahrzeug und alle anderen Verkehrsteilnehmer wird auf 30 km/h festgelegt. Dies entspricht einer repräsentativen Geschwindigkeit für die Annäherung an eine Kreuzung dieses Typs in innerstädtischen Szenarien²³⁷. Zudem wird die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der Simulatorkrankheit bei den Probanden durch die geringere Dynamik reduziert. Der letzte Grund für die Wahl dieser Geschwindigkeit ist auf die gewählte Simulationssoftware zurückzuführen. Im Gegensatz zum Verhalten des Ego-Fahrzeugs basiert das Verhalten aller anderen dynamischen Verkehrsobjekte nicht auf fahrphysikalischen Modellen, was bei höheren Geschwindigkeiten zu einem unrealistischen Fahrverhalten führt, welches einen negativen Einfluss auf das Verhalten der Probanden haben kann. Die gewählte Geschwindigkeit von 30 km/h entlang der durch die geometrische Gestaltung der Szenerie vorgegebenen Abbiegetrajektorien führt bei dem gegebenen Kurvenradius R gemäß

$$a_y = \sqrt{\frac{v_{Obj}^2}{R}} \quad (6.2)$$

zu einer maximalen Quereschleunigung a_y von $2,7 \text{ m/s}^2$. Dieser Wert liegt innerhalb des von Fahrern gewählten Bereichs²³⁸. Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit der Ergebnisse verhalten sich die dynamischen Verkehrsobjekte in allen Szenarien eines Typs identisch. Um Lerneffekten im Laufe der Untersuchung vorzubeugen, werden die visualisierten Fahrzeugtypen per Zufallsprinzip variiert.

²³⁶ Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2006): Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen RAS^t 06, Abschnitt 6.1.1.2 Zweistreifige Fahrbahnen, S.70 und Abschnitt 6.3.9.2 Eckausrundungen, S. 123

²³⁷ Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (1988): Richtlinie für die Anlage von Straßen (RAS), Abschnitt 1.1.4 Entwurfsprinzipien, S. 10

²³⁸ Vgl. Gruber et al. (2012): Bremssysteme, S. 498

6.4.3 Subjektives Kritikalitätsmaß

Wie eingangs dargestellt, wird die stark subjektive Einschätzung der Kritikalität von Verkehrsszenarien zusätzlich durch die beschriebenen, negativen Eigenschaften eines statischen Fahrsimulators, wie der schlechten Einschätzbarkeit von Abständen, Verzögerungen und Geschwindigkeiten anderer Verkehrsteilnehmer beeinflusst. Als Grundlage für die Bewertung der Sicherheit eines absolvierten Szenarios wird daher neben der Kollisionsfreiheit ein individuelles Kritikalitätsmaß für jeden Probanden ermittelt. Dieses Kritikalitätsmaß basiert auf der Bestimmung der von dem jeweiligen Probanden noch als sicher bewerteten Time-to-Intersection (*TTI*) anderer Verkehrsteilnehmer. Hierzu werden dem Probanden unterschiedliche Kreuzungsszenarien vorgespielt, deren Kritikalität er bewerten soll. In dem ersten Szenariotyp passiert das Ego-Fahrzeug eine X-Kreuzung, während sich ein anderes Fahrzeug der Kreuzung von rechts nähert. In dem zweiten Szenariotyp biegt das Ego-Fahrzeug an der identischen X-Kreuzung links vor einem entgegenkommenden Fahrzeug ab. Die geometrische Gestaltung der Kreuzungsszene entspricht dabei der der zuvor beschriebenen Versuchsszenarien. Das Ego-Fahrzeug und die sich der Kreuzung nähernden Fahrzeuge haben eine konstante Geschwindigkeit von jeweils 30 km/h. Die Berechnung der *TTI* der sich der Kreuzung nähernden Verkehrsteilnehmer erfolgt gemäß Formel (6.3) für den in Abbildung 6-5 dargestellten Zustand 1, bei dem sich der Schwerpunkt des Ego-Fahrzeugs an der Position des als Kollisionspunkt bezeichneten Schnittpunkts der Trajektorien des Ego-Fahrzeugs und des sich nähernden Fahrzeugs befindet:

$$TTI_{obj}(t_{KP}) = \frac{d_{Obj,1}(t_{KP})}{v_{Obj}(t_{KP})}; x_{ego}(t_{KP}) = x_{KP} \quad (6.3)$$

Bei konstantem Initialabstand des Ego-Fahrzeugs $d_{ego,0}$ und variablem Initialabstand des sich der Kreuzung nähernden Fahrzeugs $d_{obj,0}$ werden Szenarien unterschiedlicher Kritikalität in einem Bereich von $TTI_{obj}=1-10$ s erzeugt.

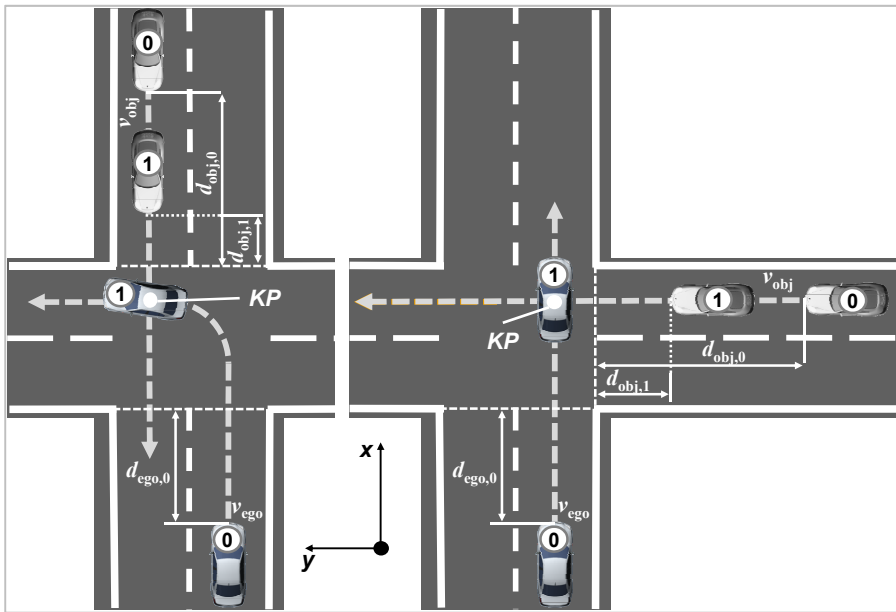


Abbildung 6-5: Bestimmung des subjektiven Kritikalitätsmaßes anhand der Manöver „Linksabbiegen“ und „Kreuzung passieren“.

Die Probanden erleben hintereinander mehrere Szenarien eines Typs, wobei die *TTI* in Schritten von 2 s variiert wird. Hierbei wird die Reihenfolge des Szenariotyps (Linksabbiegen/Kreuzung passieren) sowie die Richtung der *TTI*-Variation (aufsteigend/absteigend) über alle Probanden permutiert. Nach jeder Variation werden die Probanden gebeten, eine Bewertung des erlebten Szenarios anhand einer vierstufigen Skala vorzunehmen. Diese, in Abbildung 6-6 dargestellte, Skala basiert auf der von Hohm²³⁹ entwickelten Skala zur Beurteilung von Überholzszenarien, die für den Untersuchungszweck dieser Studie angepasst wurde. Sobald bei der Bewertung einer Szenariovariation das Grenzlevel zwischen „sicher“ und „unsicher“ überschritten wird, erfolgt eine Variation der *TTI* in die entgegengesetzte Richtung in Schritten von 1 s bis die Bewertung erneut zu einer Überschreitung des Grenzlevels führt. Der niedrigste Wert für die *TTI* aller als sicher bewerteten Szenarien eines Typs wird für den jeweiligen Probanden als individuelles, subjektives Kritikalitätsmaß $TTI_{kritisch}$ festgelegt.

²³⁹ Hohm (2010): Umfeldklassifikation und Identifikation von Überholzielen für ein Überholassistentensystem, S. 52

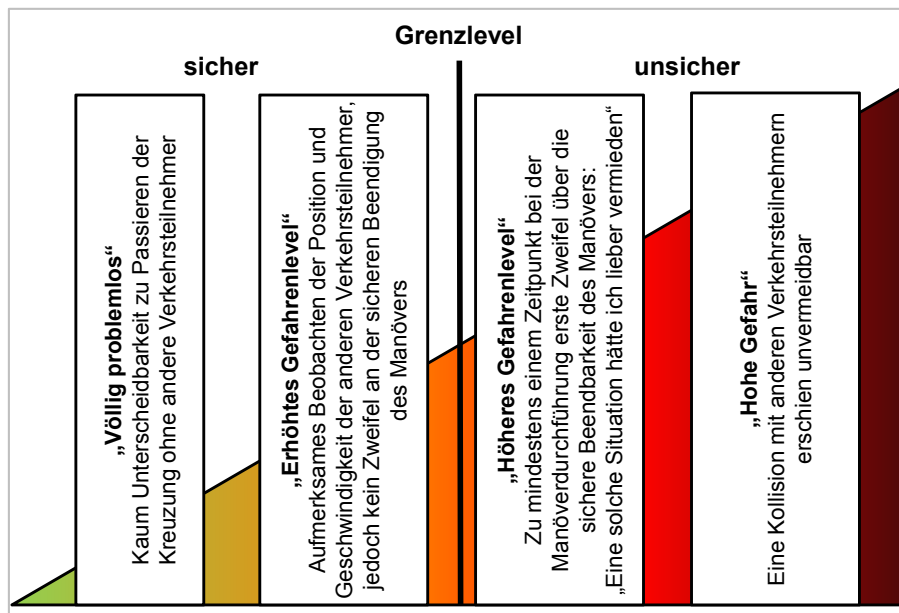


Abbildung 6-6: Skala zur Bewertung der Kritikalität (basierend auf Hohm²³⁹)

6.4.4 Versuchsablauf

Der entwickelte Versuchsplan ergibt sich durch Kombination der folgenden Untersuchungsparameter:

- Systemausprägung: Anzeige (AL 1), Vorschlag (AL 2), Entscheidung (AL 3)
- Verkehrsszene: Passieren des Gates möglich, Passieren des Gates nicht möglich
- Verhalten der Automation: szenariogerecht, nicht szenariogerecht

Nach Vernachlässigung der nicht sinnvollen Kombinationen²⁴⁰ wird der Umfang des Versuchsplans weiter reduziert. So wird das nicht szenariogerechte Verhalten der Automation nur in Kombination mit einer Verkehrsszene untersucht, die das sichere Passieren des Gates nicht zulässt. Diese Maßnahme beruht auf der Annahme, dass dieses Szenario von den Probanden als kritischer bewertet wird als die Kombination mit einer Verkehrsszene, die das Passieren des Gates zulässt²⁴¹. Ferner erleben die Probanden für den Automationsgrad 3 nur die Fälle, in denen die Automation eine Entscheidung trifft. Die Szenarien, in denen die Automation bei dem Automationsgrad 3 einen Vorschlag machen würde, sind identisch zu den für den Automationsgrad 2 betrachteten Szenarien. Diese Überlegungen führen zu den in Tabelle 6-2 dargestellten Versuchsblöcken AL 1,

²⁴⁰ Beispielsweise die Kombination des Automationsgrades AL 1 mit einem nicht szenariogerechten Verhalten der Automation.

²⁴¹ Eine spätere Systemauslegung des Gate-Konzepts wird vermutlich das Ziel der Minimierung von Falsch-Negativ-Fehlern haben, wodurch die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten dieses Szenariotyps reduziert wird.

AL 2 und AL 3. Bei allen Versuchsblöcken erleben die Probanden zunächst ein szenariogerechtes Verhalten der Automation. Grund hierfür ist die Annahme, dass dies dem späteren Erleben von realen Nutzern entspricht. Zur Vermeidung von Reihenfolgeeffekten werden die Versuche V1 bis V7 innerhalb eines Blocks permutiert. Zur Untersuchung eines möglichen Lern- beziehungsweise Reihenfolgeeffekts wird der erste Versuch V1 am Ende eines Blocks wiederholt. Um einen möglichen Reihenfolgeeffekt weiter zu reduzieren werden die drei Versuchsblöcke zu $3! = 6$ Versuchsreihen kombiniert. Um das Erleben der unterschiedlichen Automationsgrade nicht zu unterbrechen, werden die Versuche zur Bestimmung des subjektiven Kritikalitätsmaßes abwechselnd vor oder nach der Versuchsreihe durchgeführt. Demnach lassen sich die 42 Probanden dieser Studie in Gruppen von je sieben Probanden auf die sechs Versuchsreihen aufteilen.

Tabelle 6-2: Reihenfolge der Versuche für die drei Versuchsblöcke AL 1, AL 2 und AL 3

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	Manöver G: Geradeaus L: Linksabbiegen Verkehrsszene P: Passieren A: Anhalten Verhalten der Automation R: Richtig F: Falsch
AL 1	G.P.R	L.P.R	G.A.R	L.A.R	G.P.R			
AL 2	G.A.R	L.P.R	G.A.F	G.P.R	L.A.F	L.A.R	G.A.R	
AL 3	L.P.R	G.A.F	G.P.R	L.A.F	L.P.R			

Zur Sicherstellung des gleichen Vorwissens erhalten die Probanden vor Beginn des ersten Versuchs eine allgemeine, schriftliche Versuchsbeschreibung. Diese erläutert den Ablauf der Simulatorstudie, die Aufgabe des Probanden sowie die Grundlagen des Interaktionskonzepts. Diese Beschreibung enthält zudem einen Hinweis auf mögliche Fehlentscheidungen der Automation aufgrund einer fehlerhaften Interpretation des Fahrzeugumfelds. Weiter werden die Probanden gebeten, sich wie in ihrem eigenen Fahrzeug und gemäß der StVO zu verhalten sowie die Szenarien möglichst zügig und sicher zu absolvieren. Zu Beginn eines jeden Blocks der Versuchsreihe werden dem Probanden die jeweilige Systemausprägung sowie die spezifischen Anzeigen aus Abbildung 6-3 zur Entscheidungsassistenz erläutert. Nach dieser Erläuterung erfolgt eine kurze Eingewöhnung des Probanden anhand einer Reihe zu passierender Gates auf gerader Strecke.

Im Folgenden durchfahren die Probanden die in Tabelle 6-2 aufgeführten Versuchsszenarien. Das von der Automation ausgeführte Manöver (Linksabbiegen oder Kreuzung passieren) ist hierbei vorgegeben und wird den Probanden bei der Annäherung an die

Kreuzung bei einer *TTG* von 8 s angezeigt. Das Manöver und die Geschwindigkeit können nicht von den Probanden beeinflusst werden. Die Zufahrt auf die Kreuzung erfolgt in allen Szenarien ohne ein vorausfahrendes Fahrzeug. Die Anzeige des Manövers ist gefolgt von der automationsgradabhängigen Anzeige der Entscheidungsassistenz gemäß Abbildung 6-3 bei einer *TTG* von 6 s²⁴². Die Aufgabe der Probanden besteht nun darin, über das Verhalten an dem nächsten Gate zu entscheiden. Die einzelnen Szenarien werden stets unterbrochen, nachdem das Ego-Fahrzeug die Kreuzung verlassen hat. Hierdurch wird erneut die Wahrscheinlichkeit einer auftretenden Simulatorkrankheit durch kurze Erholungspausen reduziert. Zudem ist eine direkte Folge von Szenarien mit dem aktuellen Stand der Simulationssoftware nicht darstellbar. Je Proband ergibt sich somit eine Gesamtversuchsdauer von 60 bis 90 Minuten.

6.4.5 Probandenbefragung

Ergänzend zu der Auswertung der aufgezeichneten Versuchsdaten werden die Probanden mittels Fragebögen zu dem subjektiven Systemeindruck befragt. Wie bereits erwähnt, erfolgt vor Beginn der Versuche eine allgemeine Befragung zur Ermittlung der Technikaffinität, den bereits gemachten Erfahrungen mit FAS, den Freizeitaktivitäten im Bezug auf Computerspiele sowie den bekannten Sehschwächen. Nach jedem Versuchsblock folgt eine Befragung zu dem Eindruck der jeweils erlebten Systemausprägung. Zusätzlich zu diesen, von den Probanden selbst ausgefüllten Fragebögen, erfolgen während der Versuchsdurchführung auf Fragebögen basierende Befragungen durch den Versuchsleiter. Hierzu zählt eine Befragung direkt im Anschluss an die Szenarien, in denen sich die Automation nicht szenariogerecht verhalten hat. Hierbei wird zunächst abgefragt, ob den Probanden etwas aufgefallen ist. Wird diese Frage positiv beantwortet, werden die Probanden weiter zu möglichen Gründen für das Verhalten der Automation sowie zur Einschätzung der Kontrollierbarkeit und Sicherheit des erlebten Szenarios befragt. Die Formulierung der jeweiligen Fragen ist Anhang E.2 zu entnehmen.

6.5 Probandenverhalten

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Probandenstudie zu den zuvor beschriebenen Untersuchungsschwerpunkten dargestellt. Die statistische Auswertung basiert auf der Überprüfung der Unterschiedshypothese zweier Verteilungen. Hierzu wird die

²⁴² Bei der Wahl dieser Zeitpunkte wurden die Ergebnisse der in Abschnitt 2.2.3 beschriebenen Fahrerhaltensuntersuchungen an Entscheidungspunkten von van der Horst zu Grunde gelegt. Der durchschnittliche Zeitpunkt der Entscheidung erfolgt bei einer *TTI* von 4 s. Die Addition der durchschnittlichen Entscheidungsdauer nach Olson und Farber von 2 s ergibt eine *TTG* von 6 beziehungsweise 8 s.

Irrtumswahrscheinlichkeit (p-Wert) mit statistischen Verfahren ermittelt und mit einem Signifikanzniveau von 5% verglichen. Das Vorgehen zur Auswahl des geeigneten Verfahrens (Abbildung 6-7) erfolgt in Abhängigkeit der für dessen Anwendbarkeit zu erfüllenden Bedingung hinsichtlich der Annahme einer Normalverteilung. Hierzu wird die Hypothese auf Normalverteilung mit dem Lilliefors-Test überprüft. Für den Fall, dass die Hypothese auf Normalverteilung nicht widerlegt werden kann, erfolgt ein Vergleich zweier Verteilungen anhand ihrer Mittelwerte mit dem t-Test, je nach Anwendungsfall für abhängige oder unabhängige Stichproben. In dem Fall, in dem keine Normalverteilung angenommen werden kann, erfolgt die Untersuchung der Gleichheitshypothese mit dem Wilcoxon-Rangsummentest.

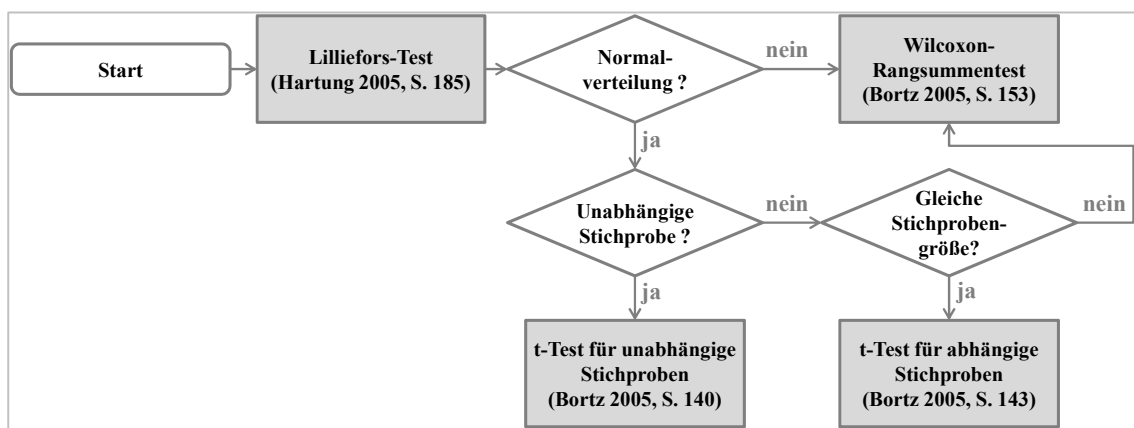


Abbildung 6-7: Auswahl der statistischen Verfahren²⁴³

Je nach ermitteltem p-Wert wird zwischen einem „signifikanten“ ($p \leq 5\%$), „hochsignifikanten“ ($p \leq 1\%$) und „höchstsignifikanten“ ($p \leq 0,1\%$) Ergebnis unterschieden.

6.5.1 Kritikalitätsbewertung

In Abbildung 6-8 ist die Verteilung des ermittelten subjektiven Kritikalitätsmaßes in Form der niedrigsten, von den Probanden als sicher bewerteten $TTI_{kritisch}$ der sich der Kreuzung nähernden Fahrzeuge für die 42 Probanden dargestellt. Die Verteilung bestätigt die Annahme der stark subjektiv geprägten Bewertung für die beiden Szenarien „Kreuzung passieren“ und „Linksabbiegen“, die sich durch eine Spannweite der Verteilung der $TTI_{kritisch}$ von 1 s bis 9 s ausdrückt.

²⁴³ Die Beschreibung zu den einzelnen Verfahren sind Bortz (2005): Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler und Hartung et al. (2005): Statistik: Lehr und Handbuch der angewandten Statistik an den in der Abbildung angegebenen Stellen zu entnehmen.

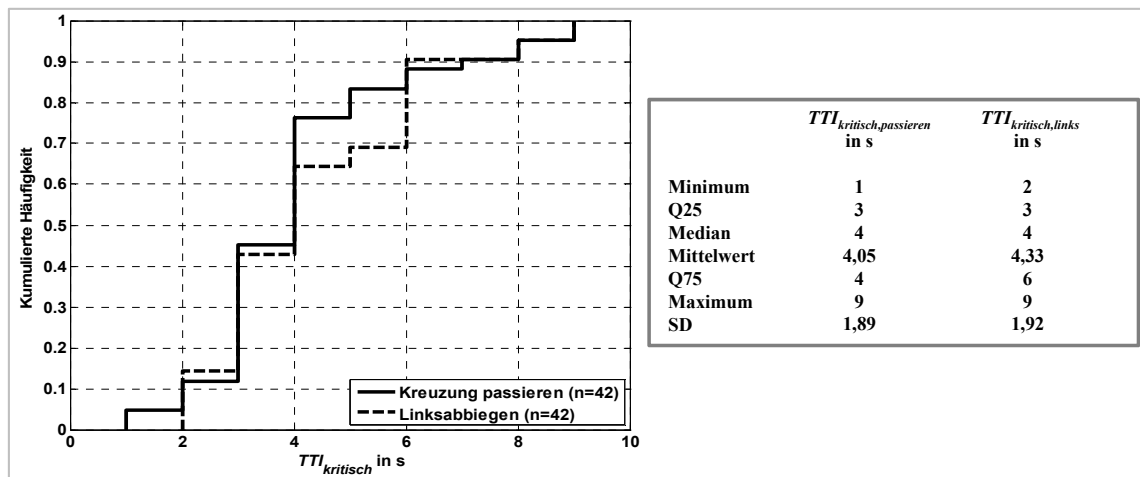


Abbildung 6-8: Subjektives Kritikalitätsmaß für die Szenarien „Kreuzung passieren“ und „Linksabbiegen“

Der Schwerpunkt der Verteilungen, ausgedrückt durch den Quartilsabstand²⁴⁴, liegt für das Manöver „Kreuzung passieren“ in einem Bereich von $TTI_{kritisch} = 3-4$ s und für das Manöver „Linksabbiegen“ von $TTI_{kritisch} = 3-6$ s. Diese Ergebnisse werden durch jene anderer Untersuchungen im realen Straßenverkehr bestätigt²⁴⁵. Die größere Streuung der Verteilung für das Abbiegemanöver und die Tendenz zu höheren Werten für $TTI_{kritisch}$ liegen in der schlechteren Auflösung der Abstands- und Geschwindigkeitsinformation des Menschen durch Beobachtung der Größenänderung des entgegenkommenden Fahrzeugs im Vergleich zu einer Beobachtung der Bewegung eines sich lateral auf das Ego-Fahrzeug zubewegenden Fahrzeugs²⁴⁶. Für beide Verteilungen kann die Hypothese einer Normalverteilung falsifiziert werden. Die Untersuchung der Gleichheitshypothese der beiden Verteilungen kann mit dem Wilcoxon-Rangsummentest und $p = 0,56$ nicht widerlegt werden. Dieses Ergebnis bestätigt sich für den Vergleich der Merkmalsausprägungen des Probandenkollektivs. Einzig für das Linksabbiegemanöver kann die Gleichheitshypothese im Falle der Verteilungen für jüngere und ältere Probanden mit $p = 0,02$ signifikant widerlegt werden. Demnach akzeptieren ältere Fahrer kleinere Zeitlücken als jüngere Probanden. Die Verteilungen und statistischen Ergebnisse für die einzelnen Merkmalsausprägungen sind Anhang E.3 zu entnehmen.

²⁴⁴ Der Quartilsabstand ist die Differenz zwischen dem oberen und dem unteren Quartil. Diese sind als Werte definiert bei denen sich 25% der Merkmalswerte oberhalb beziehungsweise unterhalb des jeweiligen Quartils Q_{75} und Q_{25} befinden.

²⁴⁵ Vgl. Abschnitt 2.2.3

²⁴⁶ Vgl. Schlick: Arbeitswissenschaft, S. 335

6.5.2 Szenarienabsolvierung

Die Annäherung an ein Gate lässt sich in mehrere Phasen unterteilen. Der idealisierte Geschwindigkeitsverlauf über der Zeit ist in Abbildung 6-9 am Beispiel des Versuchsszenarios „Linksabbiegen“, bei dem zwei Gates passiert werden, dargestellt. Diesem Verlauf lassen sich die verschiedenen Schritte der kooperativen Entscheidungsfindung bezüglich dem Verhalten am Gate zuordnen. In Abbildung 6-9 sind alle möglichen Annäherungsphasen exemplarisch für den Automationsgrad 1 und für den Fall, dass der Proband die Entscheidungen erst nach einer kurzen Stillstandsphase an dem Gate trifft, dargestellt. Das Fahrzeug nähert sich dem Gate mit konstanter Geschwindigkeit $v_{ego} = 30 \text{ km/h}$. Gemäß der zuvor beschriebenen Szenariengestaltung wird dem Probanden das an der Kreuzung ausgeführte Manöver bei einer TTG von 8 s (2) sowie die Anzeige der Entscheidungsassistenz (3) bei einer TTG von 6 s über das kontaktanaloge HuD angezeigt. Im Falle einer ausbleibenden Entscheidung des Probanden wird das Gate-Annäherungsmanöver mit den zwei Verzögerungsstufen D_1 (4) und D_2 (5) automatisch initiiert. Nach einer kurzen Stillstandsphase am Gate (6) gibt der Fahrer das erste Gate frei und erhält die Anzeige der Entscheidungsassistenz für das zweite Gate (7). Im Falle einer ausbleibenden Entscheidung wird das Gate-Annäherungsmanöver für das zweite Gate mit den Verzögerungsstufen D_1 (8) und D_2 (9) initiiert. Nach einer weiteren Stillstandsphase am zweiten Gate (10) beauftragt der Proband die Fortsetzung der Manöverausführung.

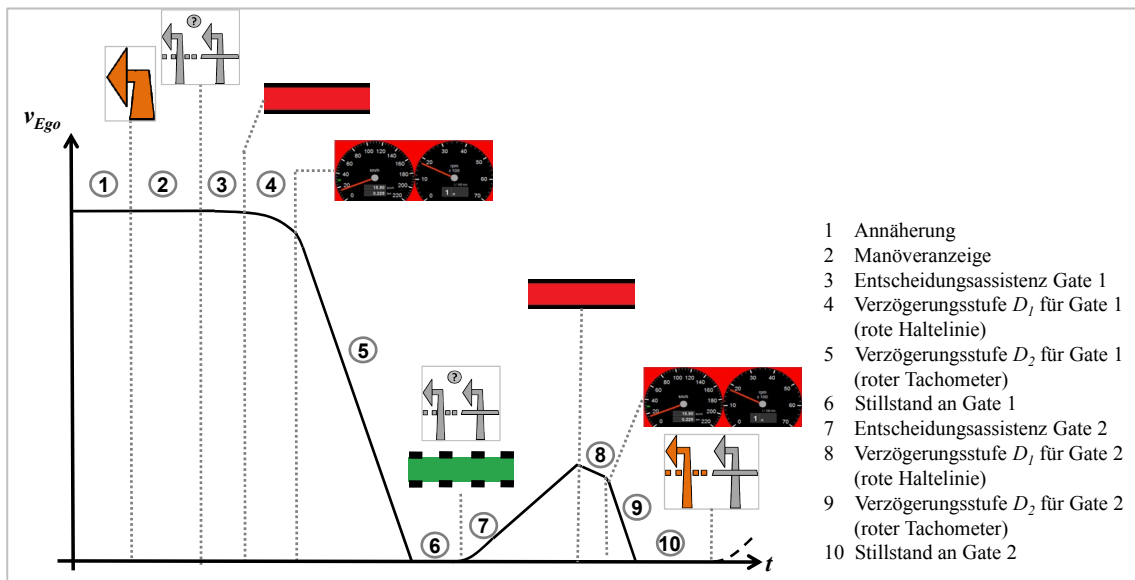


Abbildung 6-9: Idealisierter Geschwindigkeitsverlauf der Gate-Annäherung am Beispiel des Linksabbiegemanövers und des Automationsgrades 1

Zur Untersuchung der Fragestellung, ob die Versuchsszenarien durch die Probanden mit den unterschiedlichen Automationsgraden sicher absolvierbar sind (Hypothese H 4) erfolgt eine Betrachtung aller von den 42 Probanden absolvierten Szenarien in Tabelle

6-3 für die Fallunterscheidung, dass sich die Automation szenariogerecht und nicht szenariogerecht verhält. Die Bewertung erfolgt hinsichtlich der Anzahl der Kollisionen mit anderen Verkehrsteilnehmern und der Anzahl der Unterschreitungen des für jeden Probanden individuell ermittelten Kritikalitätsmaßes. In allen 546 Szenarien, in denen sich die Automation szenariogerecht verhält, wird keines dieser beiden Kriterien erfüllt.

Bei zwei Probanden, im Folgenden P_1 und P_2 genannt, kommt es beim Automationsgrad 2 in je einem Szenario, in dem die Automation einen nicht szenariogerechten Vorschlag am Gate 1 für das Manöver „Kreuzung passieren“ anzeigt, zu einer Unterschreitung des Kritikalitätsmaßes und zu einer Kollision mit anderen Verkehrsteilnehmern. Beide Probanden erleben, entsprechend der zugeteilten Versuchsreihenfolge, erstmalig ein nicht szenariogerechtes Verhalten der Automation. Die beiden Probanden²⁴⁷ geben in der Befragung zu den Gründen für die Kollision an, dass sie sich auf die Anzeige der Automation verlassen haben (P_1 und P_2) und die Situation falsch eingeschätzt haben (P_1).

Im Gegensatz zu den Ergebnissen für den Automationsgrad 2 wird im Falle des Automationsgrades 3 in allen 84 Szenarien, in denen die Automation eine nicht szenariogerechte Entscheidung trifft, von den Probanden rechtzeitig eingegriffen, wodurch, gemäß der beiden Sicherheitskriterien, keine unsicheren Szenarien entstehen.

Tabelle 6-3: Sicherheitsbewertung der absolvierten Szenarien

	Szenariogerecht			Nicht szenariogerecht		
	Szenarien	Kollisionen	$TTI \leq TTI_{kritisch}$	Szenarien	Kollisionen	$TTI \leq TTI_{kritisch}$
AL 1	210	0	0			
AL 2	210	0	0	84	2	2
AL 3	126	0	0	84	0	0

6.5.3 Entscheidungszeit bei szenariogerechtem Verhalten der Automation

Das Probandenverhalten in Interaktion mit der Automation wird zunächst für unterschiedliche Automationsgrade und ein szenariogerechtes Verhalten der Entscheidungsassistenten betrachtet. Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit zwischen den ermittelten Verteilungen erfolgt eine statistische Betrachtung nur für die Entscheidung am ersten Gate eines Szenarios, da der weitere Verlauf vom Verhalten des Probanden beeinflusst wird.

²⁴⁷ Die Probanden gehören den Merkmalsgruppen „weiblich/jünger“ (P_1) und „weiblich/älter“ (P_2) an.

Die Untersuchung des Fahrerverhaltens erfolgt zunächst für eine qualitative Zuordnung des Entscheidungszeitpunktes, gekennzeichnet durch den Zeitpunkt, zu dem die Probanden die Entscheidung durch Betätigung des Bedienelements an die Automation kommuniziert haben. Abbildung 6-10 zeigt die Häufigkeitsverteilung des Entscheidungszeitpunktes aller Probanden für die Systemausprägungen Anzeige (AL 1) und Vorschlag (AL 2) und in Abhängigkeit der Verkehrsszene, die eine sichere Passage des Gates zulässt oder nicht. Aus beiden Verteilungen ist erkennbar, dass die überwiegende Mehrheit der Entscheidungen in den Phasen getroffen wird, in denen die Automation das ausgeführte Manöver oder die Entscheidungsassistenz anzeigt. Zudem wird nur in wenigen Fällen die Entscheidung durch die Probanden unabhängig von der Kenntnis des an der Kreuzung ausgeführten Manövers getätigt. Grund hierfür ist mitunter ein bei wenigen Probanden zu beobachtendes Verhalten, grundsätzlich und unabhängig von dem Szenario ein Anhaltmanöver zu beauftragen. Zudem kann, trotz aller Maßnahmen bei der Erstellung des Versuchsdesigns, ein gewisser Lerneffekt nicht ausgeschlossen werden, der im weiteren Verlauf dieses Abschnitts genauer untersucht wird. Gemäß den beiden Diagrammen hatten die Probanden in den meisten Szenarien ausreichend Zeit, um die Entscheidung vor der automatischen Initiierung des Gate-Annäherungsmanövers (Verzögerungsstufen D_1 und D_2) beziehungsweise vor dem Stillstand am Gate zu treffen. Eine weitere Auffälligkeit ist dem rechten Diagramm für die Szenarien, in denen das Passieren des Gates nicht sicher möglich ist, zu entnehmen. Bei beiden Automationsgraden wird im Falle einer ausbleibenden Entscheidung des Fahrers automatisch ein Annäherungsmanöver initiiert, was den Probanden die Möglichkeit gibt, dem Anhalten am Gate zuzustimmen, ohne das Anhaltmanöver explizit zu beauftragen. Dennoch wird von dieser Möglichkeit nur in drei (AL1) beziehungsweise vier (AL 2) von insgesamt 84 Fällen Gebrauch gemacht. Auffällig ist zudem, dass im Falle von AL 2 im Vergleich zu AL 1 deutlich häufiger die Anzeige der Entscheidungsassistenz nicht abgewartet wird.

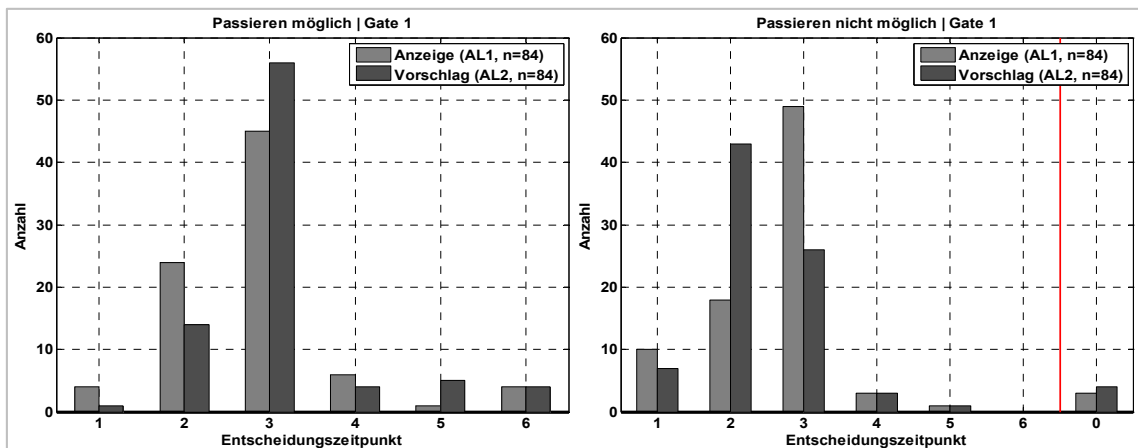


Abbildung 6-10: Häufigkeitsverteilung des Entscheidungszeitpunktes für das erste Gate über den Phasen der Gate-Annäherung in Abhängigkeit der Szene [0: keine explizite Beauftragung, 1: Annäherung, 2: Manöveranzeige, 3: Entscheidungsassistenz, 4: Verzögerungsstufe D_1 , 5: Verzögerungsstufe D_2 , 6: Stillstand am Gate]

Die Verteilung für das zweite zu passierende Gate bei Ausführung des Linksabbiegemanövers ist Abbildung 6-11 zu entnehmen. Für den Fall, dass die Szene das Passieren des Gates zulässt, wird die Entscheidung zum Passieren des Gates in den meisten Fällen während der zweiten Verzögerungsstufe getroffen. Die Entscheidung das zweite Gate zu passieren, wird in nur jeweils fünf Fällen bereits während der Annäherung an das erste Gate getroffen. Für den Fall, dass die Szene das Passieren des Gates nicht zulässt, ist eine größere Streuung des Entscheidungszeitpunkts zu erkennen. Im Vergleich zu der Betrachtung für das erste Gate fällt zudem eine höhere Anzahl an Fällen auf, in denen das Anhaltenmanöver nicht explizit beauftragt wird. In beiden Diagrammen sind keine auffälligen Unterschiede zwischen den beiden Automationsgraden zu erkennen.

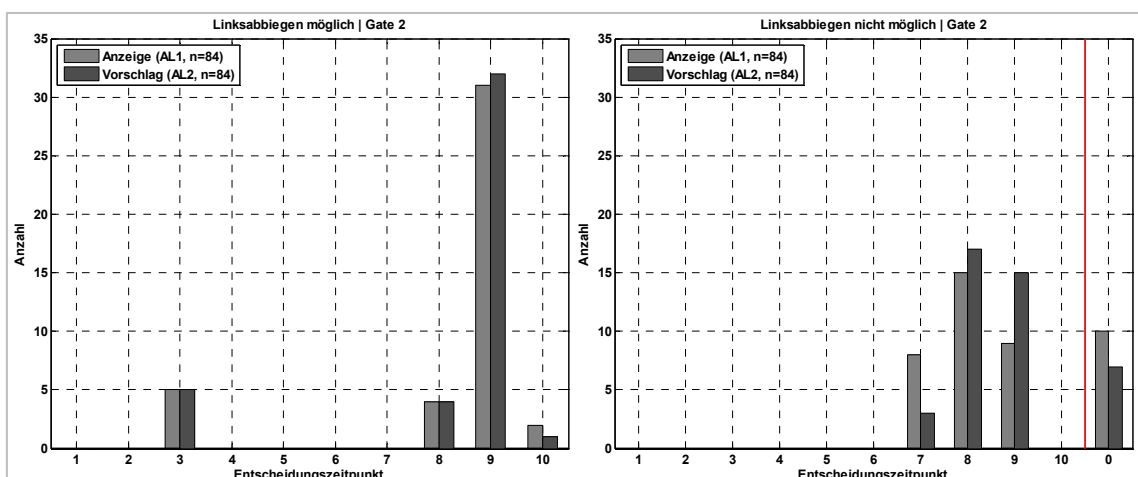


Abbildung 6-11: Häufigkeitsverteilung des Entscheidungszeitpunktes für das zweite Gate über den Phasen der Gate-Annäherung in Abhängigkeit der Szene [0: keine explizite Beauftragung, 1: Annäherung, 2: Manöveranzeige, 3: Entscheidungsassistenz Gate 1, 4: Verzögerungsstufe D_1 , 5: Verzögerungsstufe D_2 , 6: Stillstand am Gate 1, 7: Entscheidungsassistenz Gate 2, 8: Verzögerungsstufe D_1 , 9: Verzögerungsstufe D_2 , 10: Stillstand am Gate 2]

Basierend auf den Ergebnissen der qualitativen Betrachtung, werden in der folgenden statistischen Auswertung nur die aufgezeichneten Szenarien berücksichtigt, bei denen die Probanden die Entscheidung nach der Anzeige des Manövers getroffen und das Anhaltenmanöver in den Szenarien, in denen ein sicheres Passieren des Gates nicht möglich war, explizit beauftragt haben. Die Entscheidungszeit wird als Zeitdifferenz zwischen der Anzeige des an der Kreuzung von der Automation ausgeführten Manövers bis zur Kommunikation der Entscheidung durch den Fahrer über das Bedienelement definiert. Die Entscheidungszeit umfasst somit die Phase der Annäherung mit einer konstanten Geschwindigkeit und gegebenenfalls die Aktivierungsdauer des Gate-Annäherungsmanövers sowie eine eventuelle Wartezeit am Gate. Abbildung 6-12 zeigt die Verteilung der Entscheidungszeit vergleichend für die Automationsgrade 1 und 2 bei szenariogerechtem Verhalten der Automation am ersten Gate eines Szenarios. Die Darstellung zeigt eine Tendenz zu höheren Entscheidungszeiten für den Fall, dass die Automation dem Fahrer einen Vorschlag anzeigt. Dies bestätigt die Untersuchung der Gleichheitshypothese der beiden abhängigen Verteilungen mit dem Wilcoxon-Rangsummentest, die mit einem p-Wert von 0,05 signifikant widerlegt werden kann.

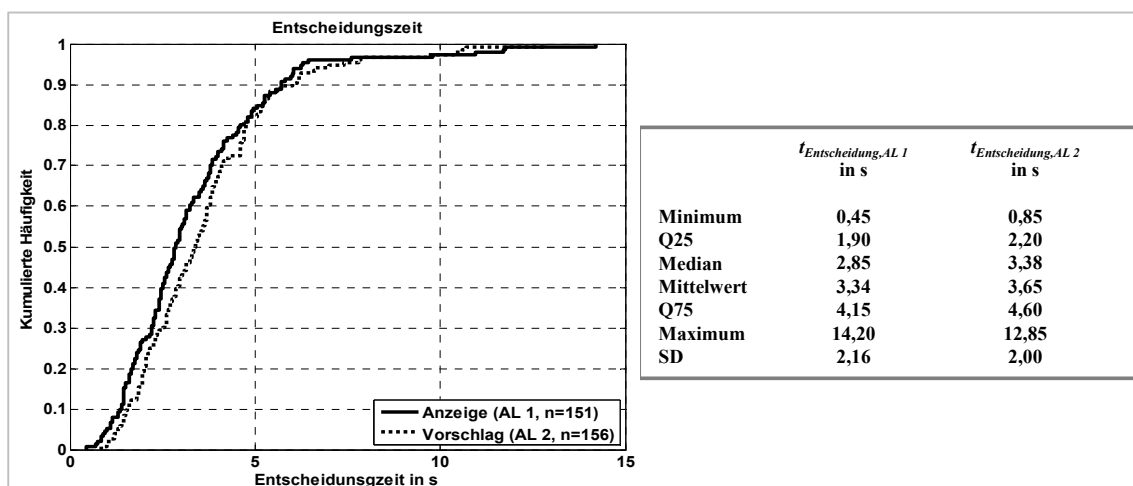


Abbildung 6-12: Kumulierte Häufigkeitsverteilung der Entscheidungszeit am ersten Gate des Szenarios für AL 1 und AL 2 bei szenariogerechtem Verhalten der Automation

Eine differenzierte Betrachtung dieses Ergebnisses für die beiden Automationsgrade und mögliche Einflussfaktoren ist in Tabelle 6-4 dargestellt. Aus dem Versuchslayout ergeben sich drei wesentliche Einflussgrößen:

- **Szene:** Je nach Gestaltung der Szene ist eine sichere Passage des Gates möglich oder nicht. Die eindeutige Gestaltung der Szene beeinflusst die für die Entscheidungsfindung zu verarbeitende Informationsmenge
- **Manöver:** Das Manöver beeinflusst die Anordnung der zu passierenden Gates während der Manöverausrührung sowie die für die Entscheidungsfindung erforderlichen Informationen

- **Erstkontakt:** Unterscheidung, ob es sich für die Probanden um einen Erstkontakt mit dem Interaktionskonzept handelt, oder ob eventuell gemachte Erfahrungen mit anderen Automationsgraden übertragen werden können.

Weiterhin wird der Einfluss der Untergruppen des Probandenkollektivs betrachtet. Die ermittelte Entscheidungszeit zeigt in allen Kategorien höhere Mediane für den Automationsgrad 2 im Vergleich zum Automationsgrad 1. Signifikante Unterschiede lassen sich für die Szenarien, in denen ein sicheres Passieren des Gates möglich ist, im Falle des Erstkontakts mit dem Interaktionskonzept und bei jüngeren Probanden nachweisen.

Tabelle 6-4: Median der Entscheidungszeit $\tilde{t}_{\text{Entscheidung}}$ für die Automationsgrade AL 1 und AL 2 und verschiedene Einflussfaktoren sowie Signifikanzbetrachtung mit Wilcoxon-Rangsummentest

		$\tilde{t}_{\text{Entscheidung, AL1}}$ in s	$\tilde{t}_{\text{Entscheidung, AL2}}$ in s	p-Wert	Signifikanz
Gesamt		2,85	3,38	0,05	signifikant
Versuchslayout					
Szene	Passieren möglich	2,70	3,55	0,02	signifikant
	Passieren n. m.	2,90	2,95	0,80	nicht signifikant
Manöver	Passieren	2,65	3,15	0,08	nicht signifikant
	Linksabbiegen	2,95	3,60	0,24	nicht signifikant
Erstkontakt	Ja	2,60	3,05	0,03	signifikant
	Nein	2,98	3,60	0,61	nicht signifikant
Probandenkollektiv					
Geschlecht	Männlich	2,90	3,30	0,18	nicht signifikant
	Weiblich	2,83	3,70	0,14	nicht signifikant
Alter	Jünger	2,95	3,60	0,04	signifikant
	Älter	2,75	3,00	0,49	nicht signifikant

Der Einfluss des Automationsgrades auf die Entscheidungszeit wird weiter durch eine Betrachtung der gleichen Einflussfaktoren ohne eine Unterscheidung des Automationsgrades deutlich. Für keine der in Tabelle 6-5 dargestellten Paarungen können statistisch signifikante Unterschiede zwischen den Verteilungen nachgewiesen werden.

Tabelle 6-5: Mediane der Entscheidungszeit $\tilde{t}_{Entscheidung}$ für verschiedene Einflussfaktoren ohne Unterscheidung des Automationsgrades sowie Signifikanzbetrachtung mit Wilcoxon-Rangsummentest

		$\tilde{t}_{Entscheidung}$ in s	p-Wert	Signifikanz
Versuchslayout				
Szene	Passieren möglich	3,25	0,15	nicht signifikant
	Passieren n. möglich	2,95		
Manöver	Kreuzung passieren	2,95	0,09	nicht signifikant
	Linksabbiegen	3,15		
Erstkontakt	Ja	2,73	0,12	nicht signifikant
	Nein	3,30		
Probandenkollektiv				
Geschlecht	Männlich	3,10	0,85	nicht signifikant
	Weiblich	3,10		
Alter	Jünger	3,30	0,09	nicht signifikant
	Älter	2,80		

Den Ergebnissen aus Tabelle 6-5 ist zudem zu entnehmen, dass Lerneffekte, durch Vergleich der Verteilungen im Bezug auf den Erstkontakt, statistisch nicht signifikant nachgewiesen werden können. Dies bestätigt die Betrachtung des ersten und letzten Versuchs der Versuchsblöcke AL 1 und AL 2. Für die in Abbildung 6-13 dargestellten kumulierten Verteilungen der Entscheidungszeit kann die Gleichheitshypothese mit einem Wilcoxon-Rangsummentest und einem p-Wert von 0,14 (AL 1) und 0,22 (AL 2) nicht signifikant widerlegt werden.

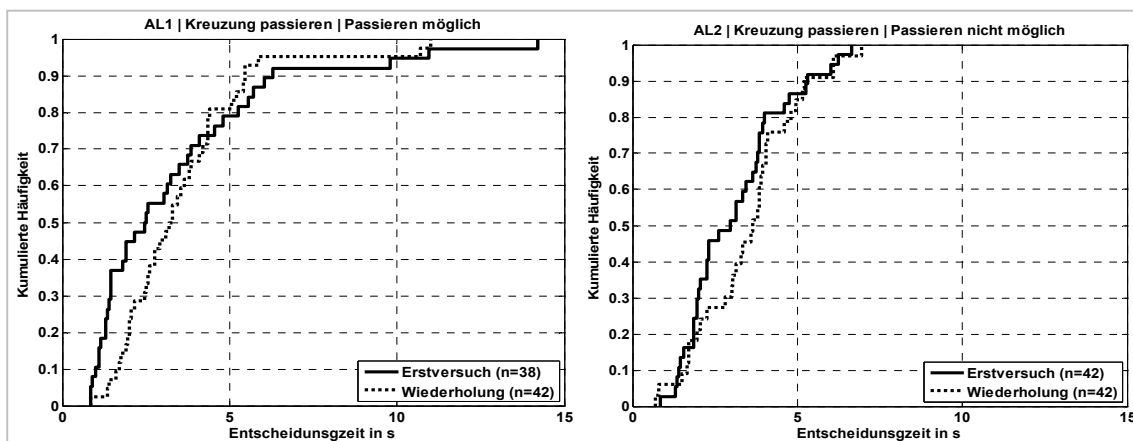


Abbildung 6-13: Kumulierte Häufigkeitsverteilung der Entscheidungszeit am ersten Gate des Szenarios für den ersten und letzten Versuch der Versuchsblöcke AL 1 und AL 2

6.5.4 Reaktionszeit bei nicht szenariogrechtem Verhalten der Automation

Entsprechend der Untersuchung der Entscheidungszeit erfolgt eine Betrachtung der Reaktionszeit des Fahrers auf eine nicht szenariogerechte Entscheidung der Automation für die Systemausprägungen „Vorschlag“ (AL 2) und „Entscheidung“ (AL 3). Abbildung 6-14 zeigt die Häufigkeitsverteilung des Reaktionszeitpunkts, gekennzeichnet durch den Zeitpunkt, zu dem die Probanden das Anhaltenmanöver durch Betätigen des Bedienelements für das erste Gate beauftragen, für alle Szenarien mit nicht szenariogrechtem Verhalten der Automation. Nahezu alle Probanden entscheiden sich, unabhängig von dem ausgeführten Manöver dazu, am ersten Gate anzuhalten. Die Ausnahme bildet ein Proband bei AL 3, der das Anhaltenmanöver erst für das zweite Gate beim Ausführen des Linksabbiegemanövers beauftragt und die beiden bereits genannten Probanden bei AL 2, die durch ihre Entscheidung, das Gate zu passieren eine Kollision mit anderen Verkehrsteilnehmern hervorrufen. Diese drei Fälle sind in der Abbildung 6-14 nicht enthalten, wodurch die unterschiedlichen Stichprobengrößen zu erklären sind. Aus beiden Verteilungen ist erkennbar, dass die überwiegende Mehrheit der Reaktionen nach erfolgter Anzeige der Entscheidungsassistenz erfolgt. Im Falle von AL 2 wird die Entscheidung zum Anhalten am Gate jedoch in 21 Fällen unabhängig von der Anzeige der Entscheidungsassistenz getroffen. Aus dieser Betrachtung geht hervor, dass den Probanden in den untersuchten Szenarien ausreichend Zeit für die Reaktion zur Verfügung steht. Die Zahl der Fälle, in denen keine explizite Beauftragung des Anhaltenmanövers beobachtet wird, ist mit vier Fällen und im Vergleich zu den Szenarien mit szenariogrechtem Verhalten der Automation unverändert.

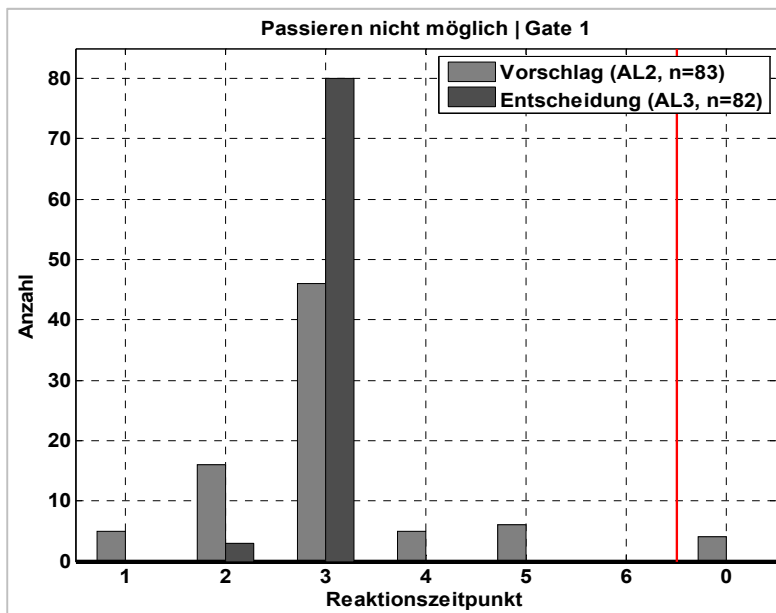


Abbildung 6-14: Häufigkeitsverteilung des Reaktionszeitpunkts für das erste Gate über den Phasen der Gate-Annäherung bei nicht szenariogerechtem Verhalten der Automation [0: keine explizite Beauftragung, 1: Annäherung, 2: Manöveranzeige, 3: Entscheidungsassistenz, 4: Verzögerungsstufe D_1 , 5: Verzögerungsstufe D_2 , 6: Stillstand am Gate]

Basierend auf den Ergebnissen der qualitativen Betrachtung, werden in der folgenden statistischen Auswertung nur die aufgezeichneten Szenarien berücksichtigt, bei denen die Probanden nach der Anzeige der Entscheidungsassistenz mit der expliziten Beauftragung des Anhaltemanövers reagiert haben. Die Reaktionszeit wird als Zeitdifferenz zwischen der Anzeige der Entscheidungsassistenz bis zum Zeitpunkt der Betätigung des Bedienelements durch den Probanden definiert. Abbildung 6-15 zeigt die Verteilung der Reaktionszeit vergleichend für die Systemausprägungen „Vorschlag“ (AL 2) und „Entscheidung“ (AL 3) bei nicht szenariogerechtem Verhalten der Automation am ersten Gate eines Szenarios. Die Darstellung zeigt eine Tendenz zu höheren Reaktionszeiten für den Fall, dass die Automation die Entscheidung eigenständig trifft und ausführt. Dies bestätigt die Untersuchung der Gleichheitshypothese der beiden abhängigen und unterschiedlich großen Verteilungen mit dem Wilcoxon-Rangsummentest, die mit einem p-Wert von 0,01 hochsignifikant widerlegt werden kann.

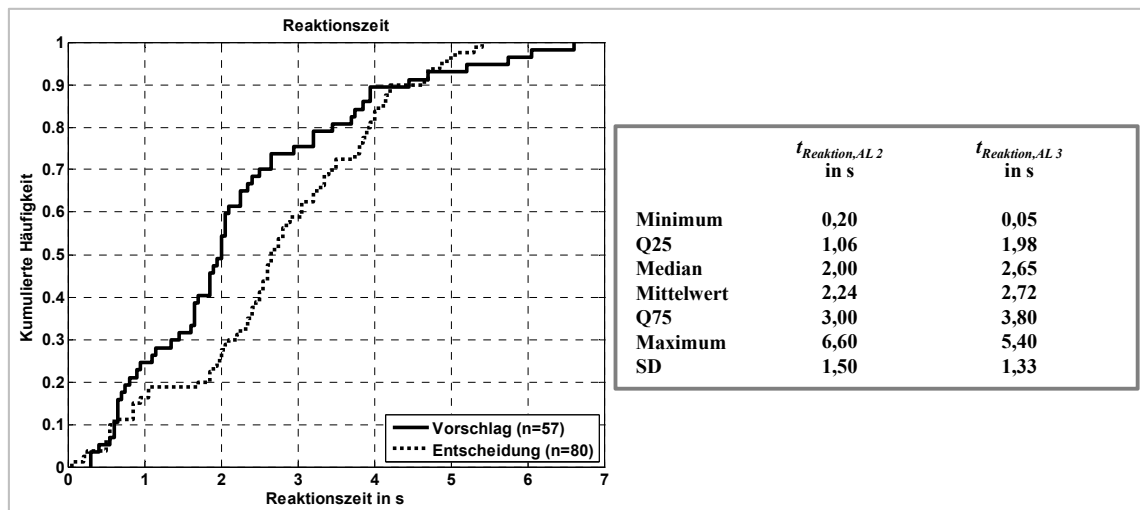


Abbildung 6-15: Kumulierte Häufigkeitsverteilung der Reaktionszeit am ersten Gate des Szenarios für AL 2 und AL 3 bei nicht szenariogerechtem Verhalten der Automation

Eine differenzierte Betrachtung dieses Ergebnisses für die beiden Automationsgrade und mögliche Einflussfaktoren aus dem Versuchslayout und dem Probandenkollektiv ist in Tabelle 6-6 dargestellt. Die ermittelte Reaktionszeit zeigt in allen Kategorien höhere Mediane für den Automationsgrad 3 im Vergleich zum Automationsgrad 2. Signifikante Unterschiede lassen sich für das Manöver „Kreuzung passieren“ im Falle des Erstkontakts mit dem Interaktionskonzept und bei jüngeren Probanden nachweisen. Bei männlichen Probanden sind hochsignifikante Unterschiede zwischen AL 2 und AL 3 nachweisbar.

Tabelle 6-6: Median der Reaktionszeit $\tilde{t}_{\text{Reaktion}}$ für die Automationsgrade AL 2 und AL 3 und verschiedene Einflussfaktoren sowie Signifikanzbetrachtung mit Wilcoxon-Rangsummentest

		$\tilde{t}_{\text{Reaktion,AL 2}}$ in s	$\tilde{t}_{\text{Reaktion,AL 3}}$ in s	p-Wert	Signifikanz
Gesamt		2,00	2,65	0,01	hochsignifikant
Versuchslayout					
Manöver	Passieren	1,85	2,70	0,03	signifikant
	Linksabbiegen	2,00	2,65	0,14	nicht signifikant
Erstkontakt	Ja	1,65	2,65	0,03	signifikant
	Nein	2,30	2,65	0,24	nicht signifikant
Probandenkollektiv					
Geschlecht	Männlich	1,90	2,65	0,01	hochsignifikant
	Weiblich	2,35	2,58	0,90	nicht signifikant
Alter	Jünger	2,00	2,63	0,05	signifikant
	Älter	1,90	2,70	0,24	nicht signifikant

Der Einfluss des Automationsgrades auf die Entscheidungszeit wird weiter durch eine Betrachtung der gleichen Einflussfaktoren ohne eine Unterscheidung des Automationsgrades deutlich. Für keine der in Tabelle 6-7 dargestellten Paarungen können, wie bereits im Falle des szenariogerechten Verhaltens der Automation, statistisch signifikante Unterschiede zwischen den Verteilungen nachgewiesen werden. Ebenso können Lerneffekte durch Vergleich der Verteilungen im Bezug auf den Erstkontakt, statistisch nicht signifikant nachgewiesen werden.

Tabelle 6-7: Mediane der Reaktionszeit $\tilde{t}_{\text{Reaktion}}$ für verschiedene Einflussfaktoren ohne Unterscheidung des Automationsgrades sowie Signifikanzbetrachtung mit Wilcoxon-Rangsummentest

		$\tilde{t}_{\text{Reaktion}}$ in s	p-Wert	Signifikanz
Versuchslayout				
Manöver	Kreuzung passieren	2,25	0,42	nicht signifikant
	Linksabbiegen	2,55		
Erstkontakt	Ja	2,15	0,22	nicht signifikant
	Nein	2,60		
Probandenkollektiv				
Geschlecht	Männlich	2,05	0,40	nicht signifikant
	Weiblich	2,45		
Alter	Jünger	2,35	0,69	nicht signifikant
	Älter	2,45		

6.6 Subjektiver Systemeindruck

Ergänzend zu den zuvor dargestellten Ergebnissen erfolgt eine Befragung der Probanden zu deren Systemeindruck. Die Probanden werden zu der Gestaltung des Anzeige- und des Bedienelements, zum Verhalten der Automation sowie zu ihrer Einschätzung bezüglich der Auswirkungen auf die Fahraufgabe befragt. Die Fragen werden entweder als Ja/Nein-Fragen oder in Form einer Aussage, zu der der Zustimmungswert auf einer sechsstufigen Skala zwischen den Extremen „Stimme voll und ganz zu“ und „Stimme überhaupt nicht zu“ anzugeben ist, gestellt. Durch die sechsstufige Skala müssen sich die Probanden zwischen einer positiven oder negativen Bewertung entscheiden, da kein neutraler Mittelwert angeboten wird.

Abbildung 6-16 und Abbildung 6-17 zeigen die Bewertung der Probanden im Bezug auf die prototypisch realisierte Mensch-Maschine-Schnittstelle und in Abhängigkeit des erlebten Automationsgrades. Die gewählte Darstellungsform ist die eines Boxplots, bei dem der in Form einer Box markierte Bereich den Interquartilsabstand kennzeichnet.

Der Median der Verteilungen ist als Kreis dargestellt. Insgesamt werden die Aussagen zur Eindeutigkeit der Informationsdarstellung über das kontaktanaloge HuD und die Unterstützung bei der Entscheidungsfindung als zutreffend bewertet. Jedoch ist eine leichte Tendenz zu schlechteren Bewertungen mit höherem Automationsgrad erkennbar. Ebenso wird von der Mehrheit der Probanden angegeben, dass sie die Anzeige nicht ablenkt.

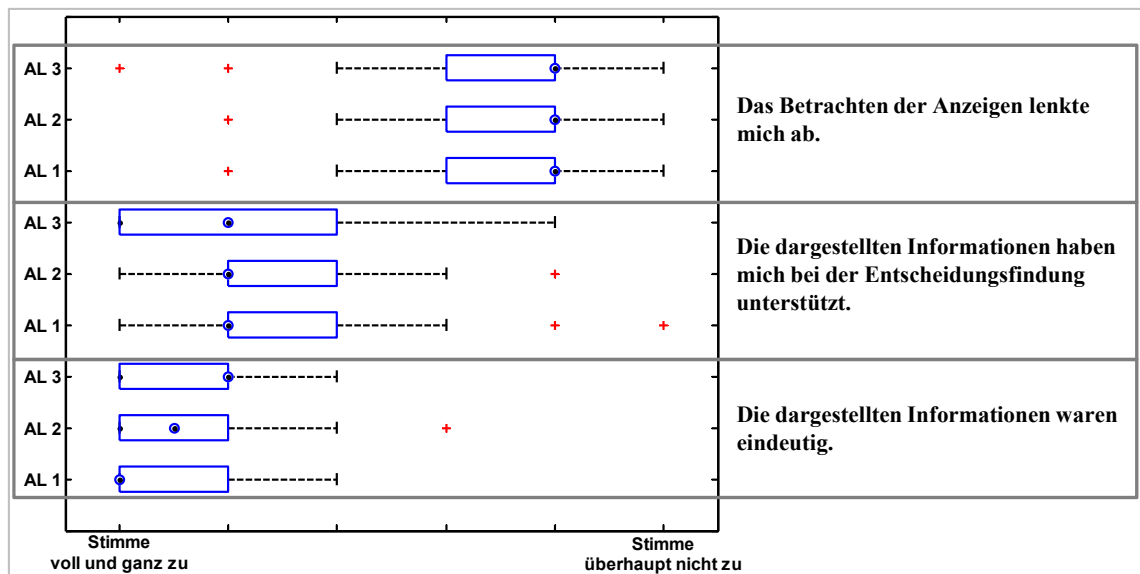


Abbildung 6-16: Bewertung der Anzeige ($n=42$, o: Median, +: Ausreißer)

Ein ähnliches Bild ergibt sich für die Bewertung des Bedienelements. Bezogen auf die Vorhersehbarkeit der Fahrzeugreaktion werden die Automationsgrade 2 und 3 etwas schlechter bewertet. Auffällig ist zudem, dass die Kontrollierbarkeit für den Automationsgrad 2 schlechter bewertet wird als für die anderen beiden.

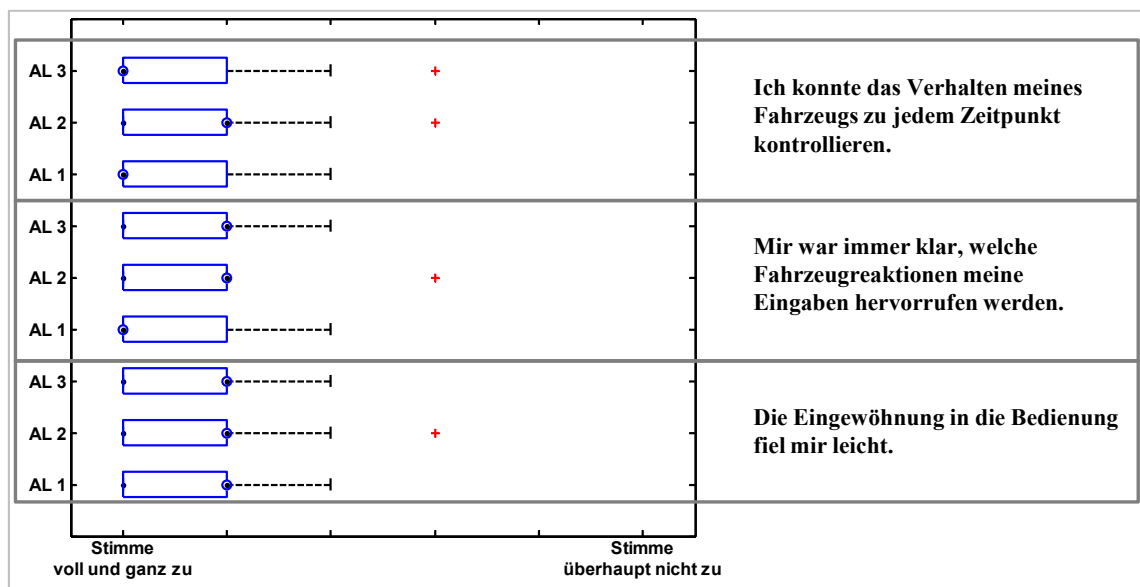


Abbildung 6-17: Bewertung der Bedienung ($n=42$, o: Median, +: Ausreißer)

In Abbildung 6-18 ist die Bewertung der Probanden hinsichtlich dem Verhalten der Automation in den verschiedenen Systemausprägungen dargestellt. Insgesamt zeigt sich auch hier eine positive Bewertung. Auffallend ist die schlechtere Bewertung des Automationsgrades 3 hinsichtlich der Nachvollziehbarkeit des Verhaltens der Automation und dem Vergleich mit dem eigenen Fahrverhalten. Die Auswertung der von den Probanden beim Ausfüllen des Fragebogens gemachten Zusatzangaben ergibt, dass das nicht szenariogerechte Verhalten den Grund für diese Bewertung darstellt.

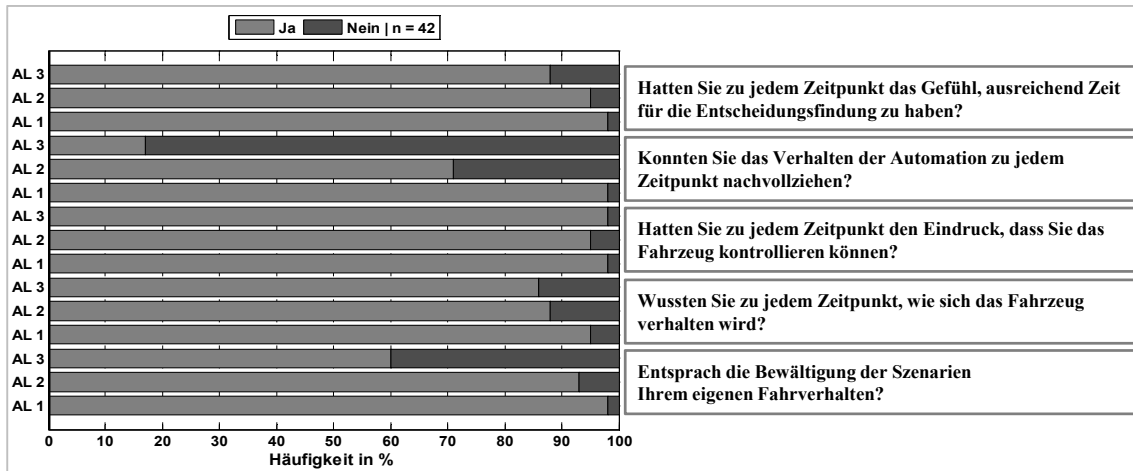


Abbildung 6-18: Bewertung des Verhaltens der Automation für die drei Automationsgrade

Die Bewertung, die direkt im Anschluss an diese Versuchsfahrten erfolgte, ist in Abbildung 6-19 dargestellt. Auffallend ist die geringe Anzahl der Fälle, in denen die Probanden das nicht szenariogerechte Verhalten der Automation beim Automationsgrad 2 bemerkt haben. Dies stützt die zuvor ausgewerteten Versuchsdaten, gemäß denen eine hohe Anzahl an Probanden die Entscheidung zum Anhalten am Gate unabhängig von der Anzeige der Entscheidungsassistenz trifft. Die Mehrheit der Probanden, die das nicht szenariogerechte Verhalten der Automation bemerkt haben, kann dieses jedoch nicht nachvollziehen²⁴⁸. Eindeutig positiv fällt die Bewertung hinsichtlich der Kontrollierbarkeit und der Reaktionszeit aus.

²⁴⁸ In den entsprechenden Versuchsszenarien wurde ein Falsch-Negativ-Fehler der maschinellen Umfeldsensorik simuliert. Aufgrund der fehlenden Kennzeichnung der erkannten Objekte im kontaktanalogen HuD hätten die Probanden auf diese Ursache schließen können.

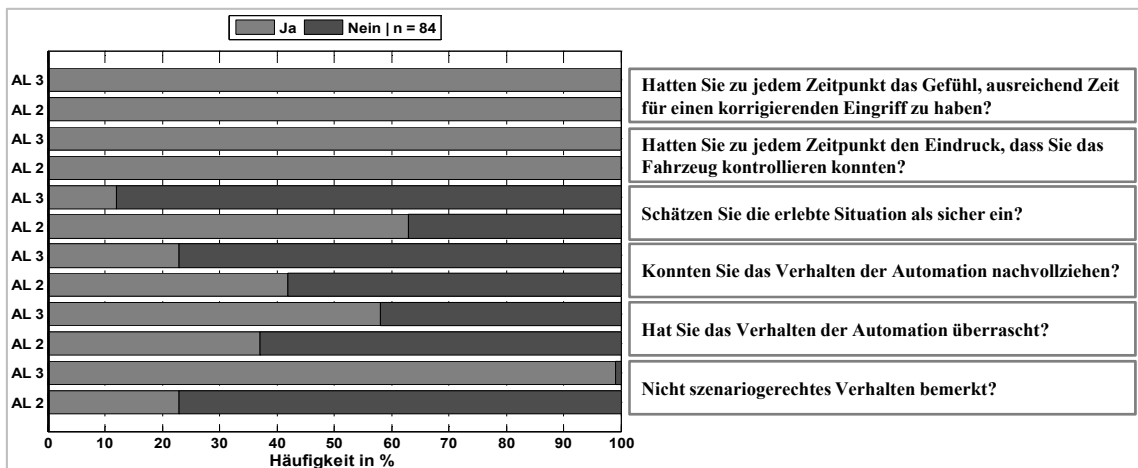


Abbildung 6-19: Beurteilung des nicht szenariogerechten Verhaltens der Automation

Zusammenfassend nimmt die Bereitschaft, mit dem Gate-Konzept Szenarien im realen Straßenverkehr zu absolvieren, wie in Abbildung 6-20 dargestellt, mit zunehmendem Automationsgrad ab. Nach Auswertung der Zusatzangaben im Fragebogen zeigt sich, dass die Automationsgrade 1 und 2 als unterstützend bewertet werden. Im Falle des Automationsgrades 3 wird jedoch die fehlende automatische Initiierung des Anhalte-maßnahmen bei ausbleibender Entscheidung des Fahrers bei Fehlentscheidungen der Automation als kritisch bewertet. Positiv im Hinblick auf die zu erwartende Situation Awareness der Fahrer ist die niedrige Anzahl der Probanden, die angeben sich während der Fahrt mit einem solchen System anderen Aufgaben zuzuwenden.

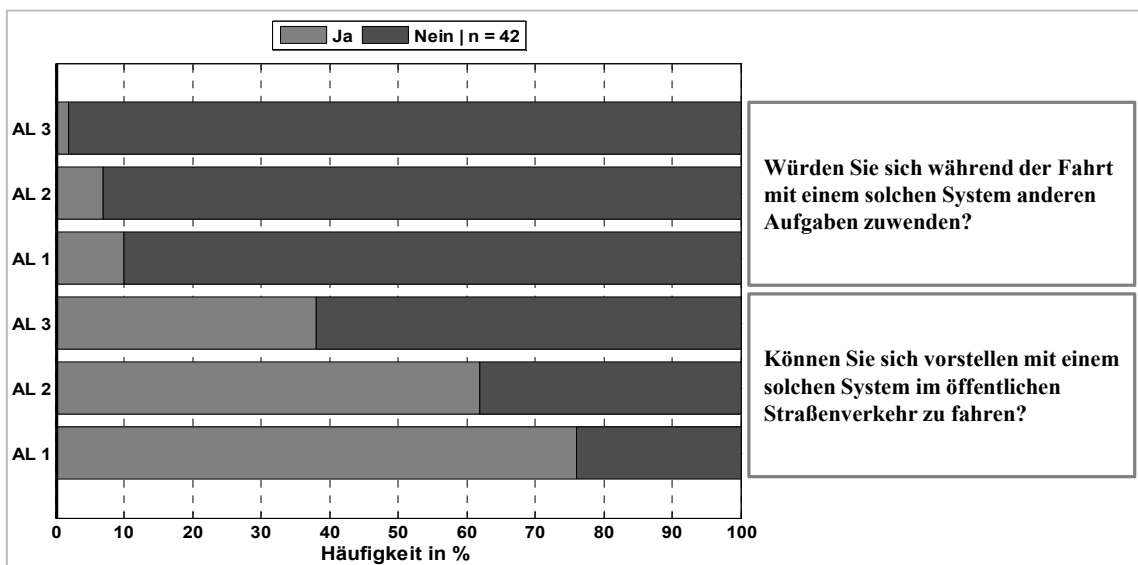


Abbildung 6-20: Bereitschaft zur Anwendung der erlebten Systemausprägungen

Diese Bewertung bestätigen die Ergebnisse aus Abbildung 6-21, nach denen die Probanden dem System insgesamt eine Komfortsteigerung attestieren. Hinsichtlich der

Frage, ob das Fahren durch das System sicherer oder einfacher wird, ergibt sich jedoch ein recht geteiltes Bild.

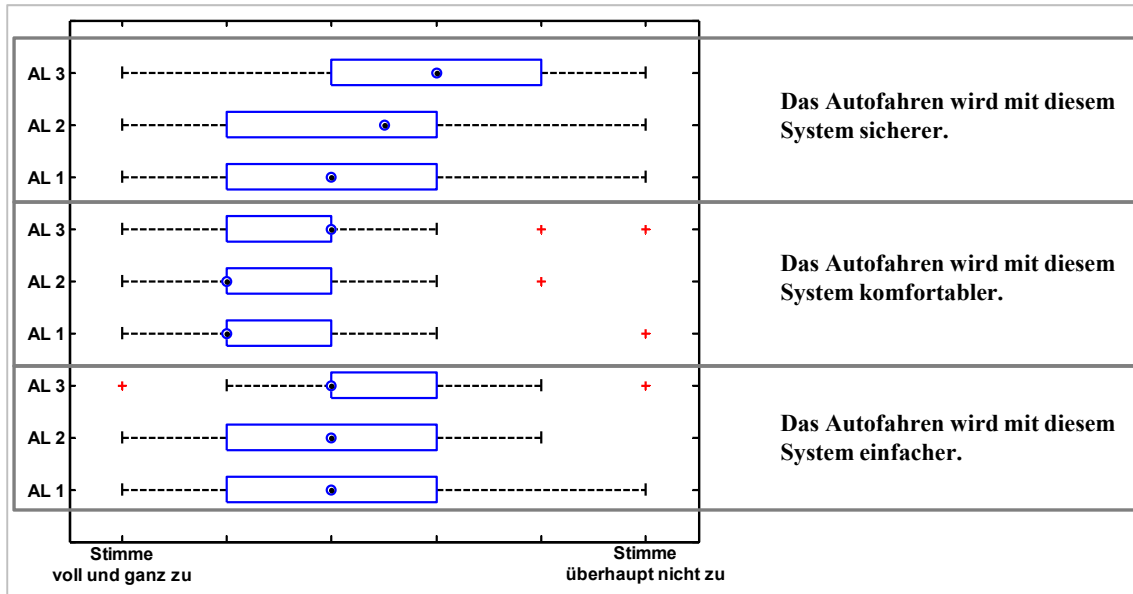


Abbildung 6-21: Bewertung der Auswirkungen auf die Ausführung der Fahraufgabe (n=42, o: Median, +: Ausreißer)

Ein ähnliches Bild zeigt sich hinsichtlich der ermittelten Kaufbereitschaft der Probanden in Abbildung 6-22.

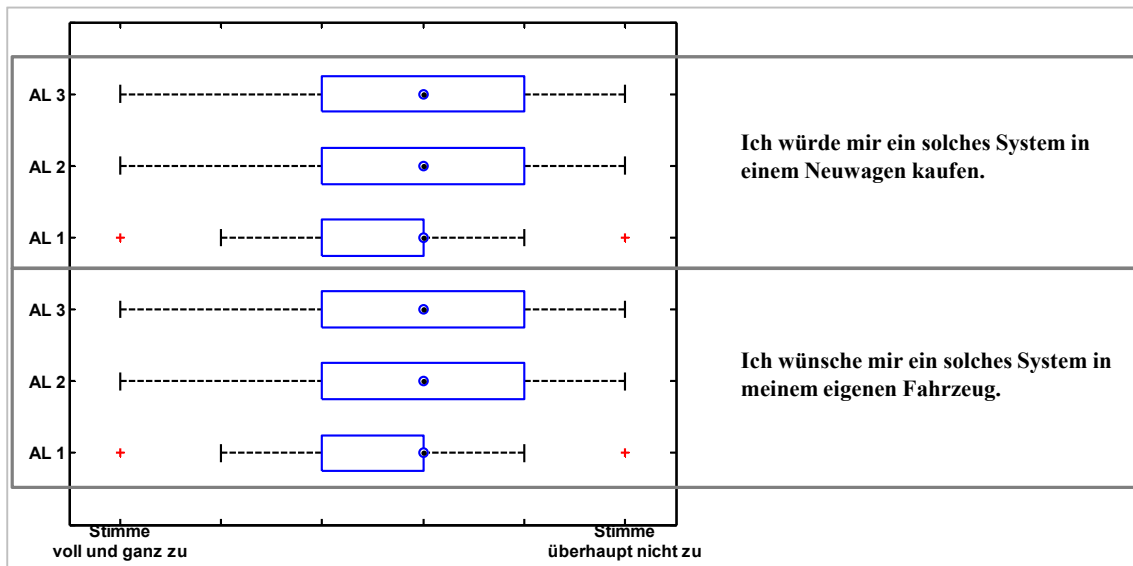


Abbildung 6-22: Kaufbereitschaft (n=42, o: Median, +: Ausreißer)

6.7 Fazit und Diskussion der Ergebnisse

Die Auswertung der Fahrsimulatorstudie mit Probanden zur Untersuchung der Gebrauchstauglichkeit des entwickelten Interaktionskonzepts führt zu unterschiedlichen Ergebnissen. Eine grundlegende Betrachtung liefert Hypothese H 4, nach der eine sichere Absolvierung repräsentativer Szenarien mit dem Gate-Konzept möglich ist. **Hypothese H 4 bewährt sich** für alle Automationsgrade für den Fall, dass sich die Entscheidungsassistenz **szenariogerecht** verhält. **Hypothese H 4** bewährt sich ebenfalls für den **Automationsgrad 3** für den Fall eines **nicht szenariogerechten** Verhaltens der Automation. Einzig für AL 2 kommt es in zwei Fällen zu einer Unterschreitung des individuellen Kritikalitätsmaßes und zu einer Kollision mit anderen Verkehrsteilnehmern. Beide Probanden geben in der Befragung an, sich auf die Anzeige der Automation verlassen zu haben und dadurch eine falsche Entscheidung getroffen zu haben. Das Auftreten dieser unsicheren Situationen kann auf unterschiedliche Ursachen zurückgeführt werden. Eine mögliche Ursache ist eine, eventuell durch die Entscheidungsassistenz beeinflusste, Fehleinschätzung der Situation durch den Probanden. Andererseits besteht jedoch auch die Möglichkeit einer für den Probanden nicht eindeutigen Aufgabenteilung und einer damit verbundenen Notwendigkeit, die Entscheidungen der Automation zu überprüfen. Eine eindeutige Trennung zwischen dem Handeln der Probanden und der Eindeutigkeit des Interaktionskonzepts ist somit nicht möglich. **Hypothese H 4 bewährt sich demnach nicht für den Automationsgrad 2** in den Fällen, in denen sich die Entscheidungsassistenz **nicht szenariogerecht** verhält.

Für die Entscheidungszeit, die die Dauer zwischen der Anzeige des von der Automation ausgeführten Manövers und dem Zeitpunkt der Entscheidung des Probanden kennzeichnet, kann die Gleichheitshypothese für die ermittelten Verteilungen von AL 1 und AL 2 signifikant falsifiziert werden, wonach **Hypothese H 5 falsifiziert ist**. Aus den ermittelten Verteilungen sind Tendenzen zu höheren Entscheidungszeiten bei AL 2 im Vergleich zu AL 1 erkennbar. Auch wenn der Versuchsaufbau nicht der Identifikation der minimal erforderlichen Entscheidungszeit dient, so kann aufgrund der ermittelten Interquartilsabstände im Bereich von 2-5 s ein höherer Zeitbedarf als der aus Untersuchungen zur konventionellen Fahrzeugführung abgeleitete Wert von 2 s angenommen werden. Die Messung deutlich höhere Werte bestätigt die in Abschnitt 2.2.2 beschriebene Beobachtung für die konventionelle Fahrzeugführung, dass sich Fahrer die maximal zur Verfügung stehende Zeit für die Entscheidungsfindung nehmen.

Für die Reaktionszeit, die die Dauer zwischen der Anzeige der Entscheidungsassistenz und dem Zeitpunkt der Beauftragung des Anhaltenmanövers durch den Probanden kennzeichnet, kann die Gleichheitshypothese für die ermittelten Verteilungen von AL 2 und AL 3 hochsignifikant falsifiziert werden, wonach **Hypothese H 6 falsifiziert ist**. Der Unterschied zwischen den beiden Verteilungen ist jedoch primär darauf zurückzuführen,

dass ein Großteil der Probanden die Entscheidung im Falle von AL 2 unabhängig von der Anzeige der Entscheidungsassistenz trifft, während die Probanden diese bei AL 3 prinzipbedingt abwarten. Hieraus lässt sich ableiten, dass die Probanden hinsichtlich ihres Verhaltens nicht zwischen den Automationsgraden 1 und 2 unterscheiden. Der für AL 3 ermittelte Interquartilsabstand von 2-4 s bestätigt die Hypothese nach einem höheren Zeitbedarf der Probanden als 2 s.

Der subjektive Systemeindruck fällt für alle Systemausprägungen insgesamt positiv aus, wobei eine Abhängigkeit der Bewertung von der nachgewiesenen Technikaffinität des Probandenkollektivs nicht auszuschließen ist. Die insgesamt sehr positive Bewertung der prototypisch gestalteten Mensch-Maschine-Schnittstelle ist aufgrund der kurzen Eingewöhnungsphase in ein gänzlich neues Fahrzeugführungskonzept dennoch nicht zu erwarten gewesen. Weitere ergonomische Optimierungsmaßnahmen sind daher als sehr vielversprechend einzuschätzen. Die Bewertung des Systemverhaltens und der damit verbundenen Kaufbereitschaft wird sicherlich stark durch die kurze Nutzungsdauer und das im Vergleich zu dem in der Realität auftretenden hohen Verhältnis von szenariogerechten zu nicht szenariogerechten Entscheidungen der Automation beeinflusst. So beschreibt beispielsweise Winner eine, ebenfalls für dieses System zu erwartende, von der Nutzungsdauer abhängige Bewertung von ACC-Systemen²⁴⁹. Darüber hinaus handelt es sich um einen vergleichsweise kurzen Erstkontakt der Probanden mit dem System. So zeigen Bengler und Mayser die Bedeutung eines abgeschlossenen Lernprozesses zur Beurteilung von Performanzkriterien im Rahmen von Probandenversuchen auf²⁵⁰. Hiervon kann im Rahmen der in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen nicht ausgegangen werden, so dass die Ergebnisse lediglich die Interpretation eines Trends erlauben und weiterführende Untersuchungen erforderlich bleiben. Zudem erleben die Probanden einen auf die kooperative Entscheidungsfindung begrenzten Ausschnitt des CbW-Funktionsumfangs. Dies führt zu der von einigen Probanden bemängelten fehlenden Möglichkeit das Fahrzeug selbst zu steuern. Es ist daher zu erwarten, dass dieser Teil der Bewertung in einer Studie, in der der gesamte Interaktionsumfang inklusive der Manöverbeauftragung durch den Fahrer betrachtet wird, zu besseren Ergebnissen führt.

²⁴⁹ Vgl. Winner (2003): Die lange Entwicklung von ACC, S. 2

²⁵⁰ Bengler et al. (2003): Probandenversuche zur Beurteilung von Fahrerinformationssystemen und Fahrerassistenzsystemen - Lerneffekte und Lösungsansätze

7 Gesamtfazit und Ausblick

Den Ausgangspunkt dieser Arbeit bildet die Fragestellung, ob eine kooperative Entscheidungsfindung hinsichtlich der Ausführbarkeit von Fahrmanövern im Kontext der teilautomatisierten Fahrzeugführung nach dem Conduct-by-Wire-Prinzip darstellbar ist. Das Ziel dieser Arbeit besteht in der Entwicklung eines Interaktionskonzepts, das die Anforderungen des Fahrers und der Automation gleichermaßen berücksichtigt, sowie der Untersuchung dessen technischer Realisierbarkeit.

Der in dieser Arbeit gewählte Top-down-Ansatz beginnt mit grundlegenden Betrachtungen auf der Systemebene. Hierzu zählen die Ermittlung der zu erfüllenden Anforderungen, wie die Identifikation repräsentativer Szenarien, einzuhaltende verhaltensrechtliche Vorschriften sowie Anforderungen des Fahrers an eine kooperative Interaktion. Das Ergebnis einer hierauf basierenden Konzeptentwicklung ist das sogenannte „Gate-Konzept“, das aus einer Segmentierung der Manöverausführung in Form zu passierender Entscheidungspunkte, den „Gates“, besteht. Aus dieser Konzeptidee werden drei Systemausprägungen abgeleitet, die sich durch den realisierten Automationsgrad und somit durch den Assistenzgrad bei der Entscheidungsfindung unterscheiden. Zudem wird das entwickelte Interaktionskonzept durch ein Sicherheitskonzept erweitert, das das Fahrzeug im Falle einer ausbleibenden Entscheidung der beiden Interaktionspartner Fahrer oder Automation in einen sicheren Zustand, dem Stillstand am Gate, überführt.

Grundlegende Betrachtungen zur Realisierbarkeit des Gate-Konzepts zeigen, dass sich dieses auf 400 repräsentative Szenarien theoretisch anwenden lässt. So sind die Position der Gates sowie der den Gates zugewiesene Informationsbedarf stets eindeutig zu definieren. Jedoch führt diese Betrachtung auch zu ersten Anforderungen an die maschinelle Umfeldwahrnehmung. Es zeigt sich, dass die zu passierende Gate-Sequenz während der Manöverausführung in Szenarien einer Klasse, beispielsweise das Linksabbiegen an Kreuzungen, abhängig von die Szenerie beschreibenden Merkmalen ist. So existiert keine standardisierbare und auf alle Szenarien einer Klasse anwendbare Gate-Sequenz. Ferner ist eine Identifikation der Szeneriemerkmale durch eine dafür geeignete Umfeldwahrnehmung erforderlich. Diese grundlegenden Betrachtungen auf der Systemebene basieren auf einem Szenarienkatalog, der systematisch aus den Richtlinien für die Anlage von Straßen und der Straßenverkehrsordnung abgeleitet wurde. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf länderspezifische Besonderheiten kann daher durch Anwendung der Methodik mit den entsprechenden Richtlinien untersucht werden.

Der zweite Teil der Arbeit befasst sich mit der Konkretisierung des entwickelten Interaktionskonzepts auf der Funktionsebene in Form einer regelungstechnischen Funktionsentwicklung sowie der Ermittlung der Anforderungen an die maschinelle Umfeldwahr-

nehmung. Hinsichtlich der regelungstechnischen Entwicklung kann gezeigt werden, dass sich der bisherige Entwicklungsstand der CbW-Systemarchitektur um eine Gate-Steuerung erweitern lässt, die kompatibel zu möglichen Funktionserweiterungen ist. Die Entwicklung des Regelverhaltens der Automation orientiert sich primär an den identifizierten Anforderungen des menschlichen Fahrers an den Entscheidungsprozess. Hierbei fließen wissenschaftliche Erkenntnisse zum menschlichen Entscheidungsprozess und aus Fahrerverhaltensuntersuchungen an Entscheidungspunkten ein. Das Hauptziel besteht in der Integration des menschlichen Fahrers im Sinne der Gewährleistung einer kooperativen Entscheidungsfindung. Hieraus leitet sich die Hauptanforderung ab, dem Fahrer ein für die Entscheidungsfindung ausreichendes Zeitpotential zur Verfügung zu stellen. Die gewählte Regelstrategie für das im Bedarfsfall automatisch initiierte Gate-Annäherungsmanöver ist die einer Signalverzögerung, bestehend aus einer ersten Verzögerungsstufe mit 1 m/s^2 , gefolgt von einer Zielbremsung mit 3 m/s^2 .

Der zweite Schwerpunkt der Untersuchung der technischen Realisierbarkeit des Gate-Konzepts besteht in einer systematischen Identifikation der sich für die unterschiedlichen Systemausprägungen ergebenden Anforderungen an die maschinelle Umfeldwahrnehmung sowie einer Bewertung deren Realisierbarkeit durch einen Abgleich mit dem heutigen Stand der Forschung und Technik. Diese Untersuchung zeigt, dass die für alle Systemausprägungen grundlegenden Anforderungen an das erforderliche Szeneriewissen und die Gate-Lokalisierung darstellbar sind. Einschränkungen ergeben sich jedoch hinsichtlich des aus dem Kontextwissen abgeleiteten Informationsbedarfs. Hierzu zählt einerseits die Reichweitenbegrenzung der untersuchten Sensorprinzipien und -ausführungen, die zu Geschwindigkeitsbegrenzungen bei der Manöverausführung führen. Andererseits handelt es sich um Anforderungen, die den erforderlichen Abdeckungsbereich der Umfeldwahrnehmung um das Ego-Fahrzeug betreffen, die aufgrund von zu erwartenden Sichtbehinderungen in nur wenigen Szenarien darstellbar sind. Letzteres gilt jedoch ebenso für die konventionelle Fahrzeugführung und stellt somit keine durch das Interaktionskonzept zusätzlich erzeugte Einschränkung dar.

Die analytischen Betrachtungen zur Funktionsgestaltung und den Anforderungen an die maschinelle Umfeldwahrnehmung basieren auf einer Reihe von Annahmen. Diese sind im Sinne der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse in den entsprechenden Abschnitten dokumentiert. Die Funktionsrealisierung erfolgt in der Simulationsumgebung IPG CarMaker unter Nutzung der Matlab/Simulink-Schnittstelle. Die erzielten Ergebnisse basieren auf einem validierten Simulationsmodell, das dennoch eine idealisierte Abbildung der Realität darstellt. So werden die realen Eigenschaften von Umfoldsensoren, wie beispielsweise Rauschen, oder Umwelteinflüsse, wie zum Beispiel Wetterbedingungen, ebenso wie bei der analytischen Ermittlung der Anforderungen an die maschinelle Umfeldwahrnehmung nicht berücksichtigt. Eine direkte Übertragbarkeit dieser Ergebnisse auf eine reale Funktionsdarstellung in einem Fahrzeug ist daher nicht zulässig.

Abschließend erfolgt die Integration des entwickelten Konzepts in einen statischen Fahrsimulator zur Untersuchung der Gebrauchstauglichkeit im Rahmen einer Studie mit 42 Probanden. Das Ziel der Untersuchung besteht in der zur technischen Bewertung ergänzenden Konzeptbewertung durch potentielle Nutzer. Neben der softwaretechnischen Umsetzung geht diesem Schritt eine prototypische Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle in Form eines Anzeige- und Bedienkonzepts voraus. Die Untersuchung erfolgt anhand repräsentativer Kreuzungsszenarien innerhalb geschlossener Ortschaften. Der Abgleich mit einem, für jeden Probanden individuell ermittelten, subjektiven Kritikalitätsmaß zeigt, dass die Probanden alle Szenarien, in denen sich die Automation szenariogerecht verhält, sicher absolvieren. Dieses gilt ebenso für den höchsten Automationsgrad, bei dem die Automation die Entscheidung zum Passieren der Gates eigenständig trifft, und einem nicht szenariogerechten Verhalten der Automation. Einzig im Falle des mittleren Automationsgrades, bei dem die Automation dem Fahrer einen Entscheidungsvorschlag anzeigt, kommt es bei zwei Probanden zu Kollisionen mit anderen Verkehrsteilnehmern. Weiterhin wird die Entscheidungszeit der Probanden sowie die Reaktionszeit im Falle eines nicht szenariogerechten Verhaltens untersucht. Bei der Entscheidungszeit zeigen sich signifikante Unterschiede zwischen den Systemausprägungen „Anzeige“ und „Vorschlag“, wobei bei letzterer längere Entscheidungszeiten ermittelt werden. Der Vergleich der Reaktionszeit für die Systemausprägungen „Vorschlag“ und „Entscheidung“ führt gar zu hochsignifikanten Unterschieden, wobei die Reaktionszeit mit dem Automationsgrad zunimmt. Eine genauere Betrachtung des Entscheidungszeitpunkts zeigt jedoch, dass ein Großteil der Probanden die Entscheidung im Falle der Systemausprägung „Vorschlag“ unabhängig von der angezeigten Entscheidungsassistenz trifft. Die subjektive Beurteilung fällt insgesamt positiv aus, wobei eine Tendenz zu schlechteren Bewertungen mit steigendem Automationsgrad erkennbar ist. Zudem ist eine Abhängigkeit der Bewertung von der nachgewiesenen Technikaffinität des Probandenkollektivs nicht auszuschließen. Aufgrund von die Beurteilung negativ beeinflussenden Parametern, wie der prototypischen Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle, der kurzen Eingewöhnungs- und Nutzungsdauer sowie des Erlebens eines Ausschnitts der Fahreraufgabe bei einer teilautomatisierten Fahrzeugführung nach dem CbW-Konzept, erscheint eine weitere Optimierung in diesen Bereichen vielversprechend.

Insgesamt lässt sich die Systemausprägung „Vorschlag“ mit dem mittleren Automationsgrad aufgrund der schlechteren Ergebnisse im Vergleich zu den anderen Systemausprägungen kritisch diskutieren. So führt dieser Automationsgrad im Vergleich zum niedrigsten Automationsgrad, bei dem der Fahrer die Entscheidung ohne Unterstützung der Automation trifft, zu längeren Entscheidungszeiten. Andererseits wird diese Systemausprägung von einigen Probanden nicht wirklich angenommen, wie die Betrachtung des Entscheidungszeitpunktes zeigt oder führt gar zu sicherheitskritischen Irritationen, die im Falle von zwei Probanden zu Kollisionen mit anderen Verkehrsteilnehmern

fürte. Diese Ergebnisse legen den Schluss nahe, dass eine klare Aufgabenteilung zwischen Fahrer und Automation in Form der Systemausprägungen „Anzeige“ und „Entscheidung“ zu bevorzugen ist.

Zur Gewährleistung der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse der Simulatorstudie erfolgt die Durchführung nach einem zuvor definierten Vorgehen, dessen Einhaltung durch den Versuchsleiter überwacht wurde. Die Versuche wurden in einem statischen Simulator unter vergleichbaren Umgebungsbedingungen (Temperatur, Lichtverhältnisse) durchgeführt. Aussagen über die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf ein reales Fahrzeug können aufgrund der in Abschnitt 6.2 beschriebenen Nachteile nicht getroffen werden. Im Sinne der Objektivität der Ergebnisse wurde auf eine Unabhängigkeit vom Untersucher geachtet. So erfolgte die Befragung der Probanden ausschließlich anhand von Fragebögen und somit anhand identischer Formulierungen. Die Auswahl der Probanden erfolgte zufällig, wobei auf eine Gleichverteilung der Merkmalsausprägungen geachtet wurde. Die statistischen Signifikanzbetrachtungen lassen einen Rückschluss auf die Reliabilität der Ergebnisse zu. So liegen die Irrtumswahrscheinlichkeiten beim Vergleich der untersuchten Systemausprägungen unter 5 %.

Die Ergebnisse dieser Arbeit liefern einen Beitrag zur Untersuchung der technischen Realisierbarkeit einer teilautomatisierten, kooperativen Fahrzeugführung nach dem Conduct-by-Wire-Konzept. Zudem bilden sie die Grundlage für die Übertragung des CbW-Konzepts auf Knotenpunktszenarien und somit auch auf, im Vergleich zu bisherigen Untersuchungen komplexere innerstädtische Szenarien. Die untersuchten Systemausprägungen können hierbei als mögliche Entwicklungsstufen des entwickelten Interaktionskonzepts angesehen werden. Beginnend mit einem niedrigen Automatisierungsgrad könnte die Migration vom heutigen assistierten zum teilautomatisierten Fahren erfolgen. In Abhängigkeit der Systemerfahrung der Nutzer und der technischen Entwicklung, insbesondere im Bereich der maschinellen Umfeldwahrnehmung, ist eine Steigerung des Automationsgrades und somit eine Erweiterung des Funktionsumfangs der Automation denkbar.

Basierend auf dieser grundlegenden Untersuchung in einer sehr frühen Konzeptphase und im Hinblick auf eine prototypische Darstellung in einem realen Fahrzeug sind weiterführende Untersuchungen erforderlich. Hierzu zählt die bereits erwähnte Optimierung der Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle. Ausgehend von dem in dieser Arbeit realisierten Anzeigekonzept, das dem Fahrer eine Vielzahl von Informationen darstellt, ist die mindestens erforderliche Informationsdarstellung zu untersuchen. So ist beispielsweise nicht geklärt, ob die Informationsdarstellung über ein Head-up-Display zwingend erforderlich ist, oder, ob der Fahrer eines CbW-Fahrzeugs das Fahrzeugverhalten, wie beispielsweise den angestrebten Zielbremspunkt und somit die Gate-Position, allein aus der kinästhetischen Rückmeldung hinreichend genau abschätzen kann. Ebenso ist eine ganzheitliche Untersuchung der Fahrzeugführungsaufgabe, beste-

hend aus der Manöverbeauftragung und der Gate-Interaktion, sowie eine damit erforderliche MMS-Ausgestaltung anzustreben. Abschließend ist der aus der Literatur bekannte Fahrfunktionskatalog für Knotenpunktszenarien systematisch zu erweitern.

A Szeneriekatalog

A.1 Merkmale und Merkmalsausprägungen

Mit (*) gekennzeichnete Merkmale oder Merkmalsausprägungen wurden in dieser Arbeit nicht berücksichtigt

Klasse: Kreuzung

- Topologie
 - T-Kreuzung
 - X-Kreuzung
 - Sternkreuzung (mehr als vier verbundene Straßenzüge)
- Vorfahrtsregelung
 - Rechts-vor-links
 - Mit vorfahrtregelnden Verkehrszeichen
 - Vorfahrt gewähren (Zeichen 205)
 - Stop (Zeichen 206)*
 - Vorfahrt (Zeichen 301)*
 - Vorfahrtsstraße (Zeichen 306)
 - Abknickende Vorfahrtsstraße
 - Mit Lichtsignalanlage
 - Gemeinsame Signalisierung aller Fahrstreifen
 - Getrennte Signalisierung des abbiegenden Verkehrs (erfordert Fahrstreifen mit Richtungsmarkierung)
 - Grüner Pfeil (Anhalten bei roter Signalisierung erforderlich)*
- Anzahl der Zufahrten
- Anzahl der Ausfahrten
- Anzahl der Fahrstreifen
 - Ego-Zufahrt
 - Andere Kreuzungszufahrten
- Fahrstreifenmarkierung*
 - Ohne
 - Mit getrennter Richtungsmarkierung
- Schnittwinkel der Fahrbahnen*
 - 90°
 - ≠90°*

- Besonderheiten
 - Führung von Rechtsabbiegern
 - Rechtsabbiegestreifen*
 - Dreiecksinseln
 - Vorfahrtsregelung
 - Mit eigener Lichtsignalanlage
 - Vorfahrt gewähren (dann nur einstreifig)
 - Beschleunigungs-/Einfädelstreifen
 - Mit*
 - Ohne
 - Führung von Linksabbiegern*
 - Linksabbiegestreifen
 - Aufstellbereich/Aufweitung der Fahrbahn
 - Wendefahrbahn
 - Anzahl der Fahrstreifen*
 - 1
 - 2
 - Fahrstreifenmarkierung*
 - Ohne
 - Mit getrennter Richtungsmarkierung
 - Vorfahrtsregelung
 - Vorfahrt gewähren
 - Mit eigener Lichtsignalanlage

Klasse: Kreisverkehr

- Topologie
 - Mini-Kreisverkehr (MK, Außendurchmesser 13-22 m)*
 - Kleiner Kreisverkehr (KK, Außendurchmesser 26-40 m)*
 - Großer Kreisverkehr (GK, Außendurchmesser 40-60 m)
- Vorfahrtsregelung
 - Rechts-vor-links
 - Mit vorfahrtregelnden Verkehrszeichen (Kreisverkehr hat Vorfahrt)
 - Mit Lichtsignalanlage (nur GK)
- Anzahl Fahrstreifen Kreisfahrbahn
 - 1
 - >2 (nur GK)
- Anzahl Fahrstreifen Zufahrten
 - 1
 - >2 (nur GK, wenn mindestens zweistreifige Kreisfahrbahn)
- Geschwindigkeitsbegrenzung*
 - 30 km/h (MK)
 - ≥ 50 km/h

- Fahrtsreifenmarkierung*
 - Ohne
 - Mit getrennter Richtungsmarkierung („Turbo-Kreisverkehr“ zur Vorsortierung)
- Schnittwinkel der Fahrbahnen
 - 90°
 - ≠90°*
- Besonderheiten
 - Bypass
 - Vorfahrtsregelung
 - Mit eigener Lichtsignalanlage
 - Vorfahrt gewähren (dann nur einstreifig)
 - Beschleunigungs-/Einfädelstreifen
 - Mit*
 - Ohne

Klasse: Querverkehr

- Fußgängerüberweg/quer verlaufender Radweg
 - Vorfahrtsregelung
 - Zebrastreifen
 - Mit Lichtsignalanlage
 - Mittelinsel*
 - Mit
 - Ohne
- Bahnübergang
 - Vorfahrtsregelung
 - Nicht technisch gesichert
 - Mit Lichtsignalanlage
 - Mit Lichtsignalanlage und beschränkt*

Klasse: Längsverkehr

- Fahrtsreifenende
 - Topologie
 - Einseitig
 - Beidseitig
 - Richtung
 - Rechts
 - Links

- Hindernis ausweichen
 - Richtung
 - Rechts
 - Links
 - Fahrstreifenwechsel erforderlich
 - Nein
 - Ja
 - auf parallelen Fahrstreifen
 - auf entgegenkommenden Fahrstreifen
- Sonderfahrstreifen
 - Typ*
 - Öffentlicher Personennahverkehr (Bus, Straßenbahn)
 - Fahrradweg
 - Richtung
 - Rechts
 - Links
- Lichtsignalanlage

A.2 Kombination von Szenerieklassem

Tabelle A-1: Kombinationen von Szenerieklassem [+ : zulässig, - : nicht zulässig]²⁵¹

	Kreuzung	Kreuzender Verkehr	Wendemöglichkeit	Sonderfahrstreifen	Fahrstreifenende	Kreisverkehr	Hindernis
Kreuzung		+	+	+	-	-	+
Kreuzender Verkehr	+		+	+	+	+	+
Wendemöglichkeit	+	+		+	-	-	+
Sonderfahrstreifen	+	+	+		-	+	+
Fahrstreifenende	-	+	-	-		+	+
Kreisverkehr	-	+	-	+	+		+
Hindernis	+	+	+	+	+	+	

²⁵¹ Basierend auf Karg (2011): Zeitliche Analyse der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion bei Conduct-by-Wire, S. 29

B Verhaltensvorschriften an Entscheidungspunkten aus der StVO

B.1 Annäherung an Entscheidungspunkte

Vorfahrt

§8.2 StVO: Wer die Vorfahrt zu beachten hat, muss rechtzeitig durch sein Fahrverhalten, insbesondere durch mäßige Geschwindigkeit, erkennen lassen, dass er warten wird. Er darf nur weiterfahren, wenn er übersehen kann, dass er den, der die Vorfahrt hat, weder gefährdet noch wesentlich behindert. Kann er das nicht übersehen, weil die Straßenstelle unübersichtlich ist, so darf er sich vorsichtig in die Kreuzung oder Einmündung hineintasten, bis er die Übersicht hat. Auch wenn der, der die Vorfahrt hat, in die andere Straße abbiegt, darf ihn der Wartepflichtige nicht wesentlich behindern.

Bahnübergänge

§19.1 StVO: Schienenfahrzeuge haben Vorrang. [...] Der Straßenverkehr darf sich solchen Bahnübergängen nur mit mäßiger Geschwindigkeit nähern.

Fußgängerüberwege

§26.1: [...] Dann dürfen sie nur mit mäßiger Geschwindigkeit heranfahren; wenn nötig, müssen sie warten.

B.2 Informationsbedarf an Entscheidungspunkten

Abbiegen

§9.1: [...] Wer nach links abbiegen will, darf sich auf längs verlegten Schienen nur einordnen, wenn er kein Schienenfahrzeug behindert. [...]

§9.3: Wer abbiegen will, muss entgegenkommende Fahrzeuge durchfahren lassen, Schienenfahrzeuge, Fahrräder mit Hilfsmotor und Radfahrer auch dann, wenn sie auf oder neben der Fahrbahn in der gleichen Richtung fahren. Dies gilt auch gegenüber Linienomnibussen und sonstigen Fahrzeugen, die gekennzeichnete Sonderfahrstreifen

benutzen. Auf Fußgänger muss er besondere Rücksicht nehmen; wenn nötig, muss er warten.

§9.4: Wer nach links abbiegen will, muss entgegenkommende Fahrzeuge, die ihrerseits nach rechts abbiegen wollen, durchfahren lassen. Führer von Fahrzeugen, die einander entgegenkommen und jeweils nach links abbiegen wollen, müssen voreinander abbiegen, es sei denn, die Verkehrslage oder die Gestaltung der Kreuzung erfordern, erst dann abzubiegen, wenn die Fahrzeuge aneinander vorbeigefahren sind.

Kreisverkehr

§9a.1: Ist an der Einmündung in einen Kreisverkehr Zeichen 215 (Kreisverkehr) unter Zeichen 205 (Vorfahrt gewähren!) angeordnet, hat der Verkehr auf der Kreisfahrbahn Vorfahrt. [...].

Besondere Verkehrsregeln

§11.1: Stockt der Verkehr, so darf trotz Vorfahrt oder grünem Lichtzeichen niemand in die Kreuzung oder Einmündung einfahren, wenn er auf ihr warten müsste.

Bahnübergänge

§19.2: Fahrzeuge haben vor dem Andreaskreuz [...] zu warten [...].

§19.4: Kann der Bahnübergang wegen des Straßenverkehrs nicht zügig und ohne Aufenthalt überquert werden, ist vor dem Andreaskreuz zu warten.

Fußgängerüberwege

§26.1: An Fußgängerüberwegen haben Fahrzeuge [...] den Fußgängern [...] welche den Überweg erkennbar benutzen wollen, das Überqueren der Fahrbahn zu ermöglichen. [...].

§26.2: Stockt der Verkehr, so dürfen Fahrzeuge nicht auf den Überweg fahren, wenn sie auf ihm warten müssten.

Lichtzeichen

§37.2.1: [...] Ein grüner Pfeil links hinter der Kreuzung zeigt an, dass der Gegenverkehr durch Rotlicht angehalten ist und dass Linksabbieger die Kreuzung in Richtung des grünen Pfeils ungehindert befahren und räumen können. [...] Nach dem Anhalten ist das Abbiegen nach rechts auch bei Rot erlaubt, wenn rechts neben dem Lichtzeichen Rot ein Schild mit grünem Pfeil auf schwarzem Grund (Grünpfeil) angebracht ist. Der Fahrzeugführer darf nur aus dem rechten Fahrstreifen abbiegen. Er muss sich dabei so verhalten, dass eine Behinderung oder Gefährdung anderer Verkehrsteilnehmer, insbesondere des Fußgänger- und Fahrzeugverkehrs der freigegebenen Verkehrsrichtung, ausgeschlossen ist. [...]

C Anwendung des Gate-Konzepts auf den CbW-Szenarienatalog

C.1 Kreuzung

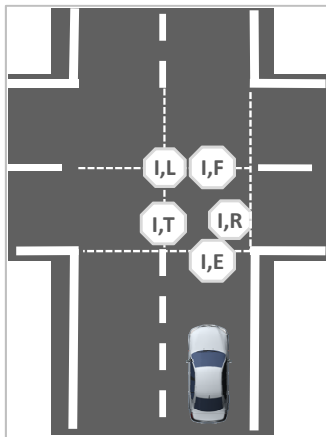


Abbildung C-1: Gate-Identifikation für Klasse „Kreuzung“ (Intersection)

Tabelle C-1: Definition der Gate-Positionen für Klasse „Kreuzung“ (Intersection)

Gate	Definition Gate-Position	Informationsbedarf
I,E	Schnittpunkt Ego-Fahrzeug mit gestrichelter Verbindungslinie zwischen der unterbrochenen Begrenzung der gekreuzten Straße	Lateral verlaufende Begrenzungslinie
	Schnittpunkt Ego-Fahrzeug mit virtueller Verbindungslinie zwischen der unterbrochenen Begrenzung der gekreuzten Straße	Begrenzung (Fahrbahnmarkierungen, Borde) der gekreuzten Straße
	Schnittpunkt Ego-Fahrzeug mit Haltlinie	Lateral verlaufende Haltlinie
I,L	Schnittpunkt Ego-Fahrzeug mit gestrichelter, vertikaler Verbindungslinie zwischen Begrenzungslinie des entgegenkommenden kreuzenden Fahrstreifens aus Richtung Norden und gegenüberliegender Kreuzungsausfahrt	Vertikal verlaufende Begrenzungslinie
	Schnittpunkt Ego-Fahrzeug mit virtueller, vertikaler Verbindungslinie zwischen Begrenzungslinie des entgegenkommenden kreuzenden Fahrstreifens aus Richtung Norden und gegenüberliegender Kreuzungsausfahrt	Begrenzungslinie des entgegenkommenden, kreuzenden Fahrstreifens aus Richtung Norden
	Schnittpunkt Ego-Fahrzeug mit Haltlinie	Diagonal verlaufende Haltlinie
I,R	Schnittpunkt Ego-Fahrzeug mit parallel um 0,5 m zur Verbindungslinie zwischen Begrenzungslinie der Ego-Zufahrt und der Begrenzungslinie der gegenüberliegenden Ausfahrt verlaufender virtueller Linie ²⁵² .	Begrenzung Kreuzungseinfahrt und gegenüberliegende Ausfahrt
I,F	Schnittpunkt Ego-Fahrzeug mit Fahrstreifenbegrenzungslinie der abknickenden Vorfahrtsstraße	Fahrstreifenbegrenzungslinie
I,T	Schnittpunkt Ego-Fahrzeug mit gestrichelter, vertikaler Verbindungslinie zwischen Begrenzungslinie des entgegenkommenden kreuzenden Fahrstreifens aus Richtung Norden und gegenüberliegender Kreuzungsausfahrt	Vertikal verlaufende Begrenzungslinie
	Schnittpunkt Ego-Fahrzeug mit virtueller, vertikaler Verbindungslinie zwischen Begrenzungslinie des entgegenkommenden kreuzenden Fahrstreifens aus Richtung Norden und gegenüberliegender Kreuzungsausfahrt	Begrenzungslinie des entgegenkommenden, kreuzenden Fahrstreifens aus Richtung Norden

²⁵² Annahme für einen in der StVO §5.8 und StVO §9.3 nicht näher definierten einzuhaltenen seitlichen Abstand, der Fahrradfahrern und Mofa-Fahrern das Passieren rechts neben dem Ego-Fahrzeug ermöglicht.

C.2 Kreisverkehr

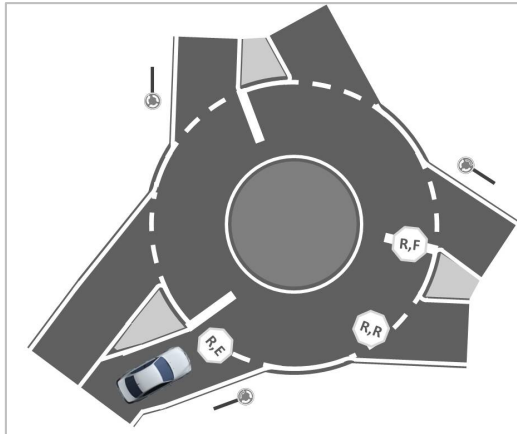


Abbildung C-2: Gate-Identifikation für Klasse „Kreisverkehr“ (Roundabout)

Tabelle C-2: Definition der Gate-Positionen für Klasse „Kreisverkehr“ (Roundabout)

Gate	Definition Gate-Position	Informationsbedarf
R,E	Schnittpunkt Ego-Fahrzeug mit gestrichelter Markierungslinie des äußeren Kreisrings	Lateral verlaufende Begrenzungslinie
	Schnittpunkt Ego-Fahrzeug mit virtueller Verbindungslinie zwischen der unterbrochenen, äußeren Begrenzung des Kreisverkehrs	Begrenzung (Fahrbahnmarkierungen, Borde) der Kreisverkehrseinfahrt
R,R	Schnittpunkt Ego-Fahrzeug mit gestrichelter Markierungslinie des äußeren Kreisrings	Parallel verlaufende äußere Begrenzung des Kreisverkehrs
	Schnittpunkt Ego-Fahrzeug mit virtueller Verbindungslinie zwischen der unterbrochenen, äußeren Begrenzung des Kreisverkehrs	Begrenzung (Fahrbahnmarkierungen, Borde) der Kreisverkehrsausfahrt
R,F	Schnittpunkt Ego-Fahrzeug mit Haltlinie	Lateral verlaufende Haltlinie
	Schnittpunkt Ego-Fahrzeug mit virtueller Verbindungslinie zwischen dem Beginn der unterbrochenen, äußeren Begrenzung des Kreisverkehrs und dem Innenring	Begrenzung (Fahrbahnmarkierungen, Borde) der Kreisverkehrszufahrt

C.3 Besonderheiten Kreuzung/Kreisverkehr

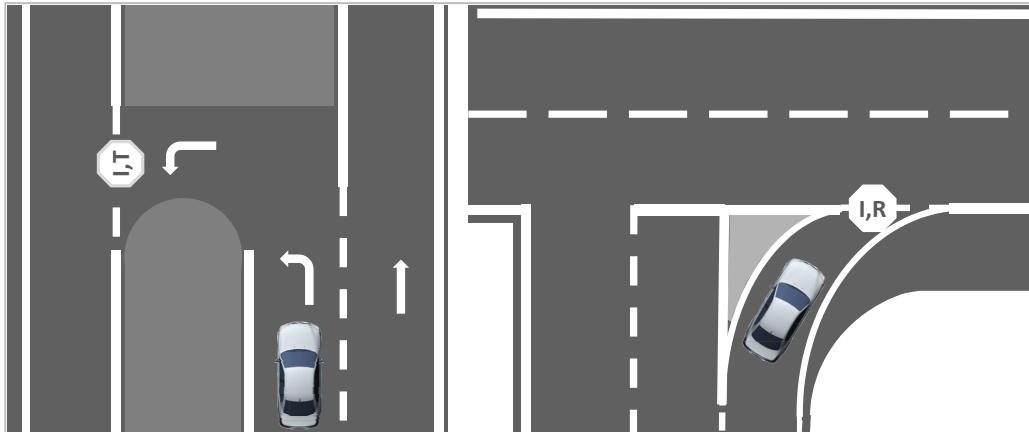


Abbildung C-3: Gate-Identifikation für Wendefahrbahn (links) und Bypass (rechts)

Tabelle C-3: Definition der Gate-Positionen für Wendefahrbahn und Bypass

Gate	Definition Gate-Position	Informationsbedarf
I,T	Schnittpunkt Ego-Fahrzeug mit gestrichelter Verbindungslinie zwischen der unterbrochenen Begrenzung der gekreuzten Straße	Lateral verlaufende Begrenzungslinie
I,R R,R	Schnittpunkt Ego-Fahrzeug mit virtueller Verbindungslinie zwischen der unterbrochenen Begrenzung der gekreuzten Straße	Begrenzung (Fahrbahnmarkierungen, Borde) der gekreuzten Straße
	Schnittpunkt Ego-Fahrzeug mit Haltlinie	Lateral verlaufende Haltlinie

C.4 Querverkehr

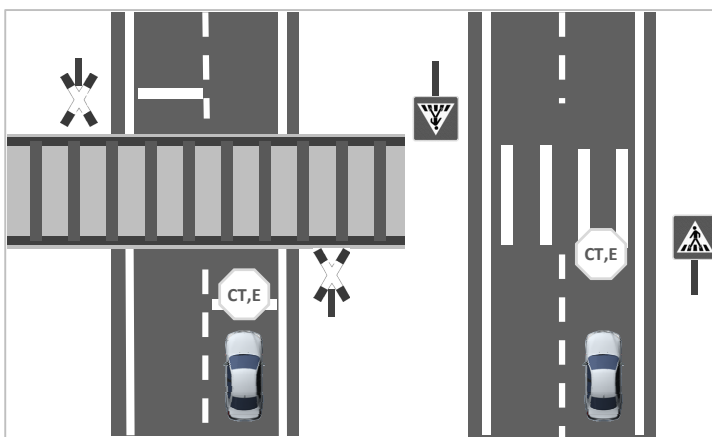


Abbildung C-4: Gate-Identifikation für Klasse „Querverkehr“ (Cross traffic)

Tabelle C-4: Definition der Gate-Positionen für Klasse „Querverkehr“ (Cross traffic)

Gate	Definition Gate-Position	Informationsbedarf
CT,E	Schnittpunkt Ego-Fahrzeug mit Haltlinie	Lateral verlaufende Haltlinie
	Schnittpunkt Ego-Fahrzeug mit virtueller Haltlinie auf Höhe des Andreaskreuzes	Verkehrszeichen
	Schnittpunkt Ego-Fahrzeug mit Begrenzungslinie des Fußgängerüberwegs	Lateral verlaufende Begrenzungslinie

C.5 Längsverkehr

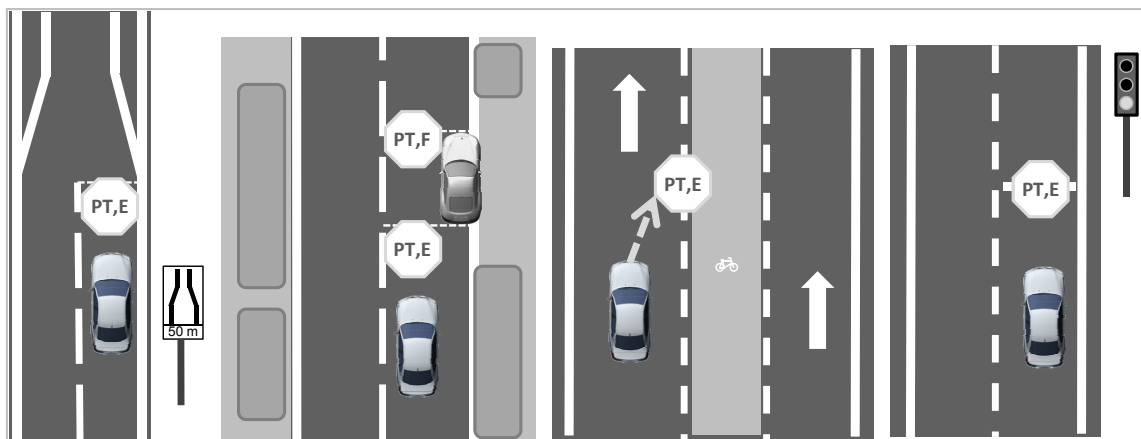


Abbildung C-5: Gate-Identifikation für Klasse „Längsverkehr“ (Parallel traffic), [v.l.n.r: Fahrstreifenende, Hindernis ausweichen, Sonderfahrstreifen überqueren, Lichtsignalanlage]

Tabelle C-5: Definition der Gate-Positionen für Klasse „Längsverkehr“ (Parallel traffic)

Gate	Definition Gate-Position	Informationsbedarf
PT,E	Schnittpunkt Ego-Fahrzeug mit virtueller Haltlinie an der Stelle, an der die Breite des eigenen Fahrstreifens abnimmt	Begrenzung (Fahrbahnmarkierungen, Borde), Verkehrszeichen
	Schnittpunkt Ego-Fahrzeug mit virtueller Haltlinie in einem für die Ausführung des Ausweichmanövers ausreichenden Abstand	Hinderniserkennung, Begrenzung (Fahrbahnmarkierungen, Borde)
	Schnittpunkt Ego-Fahrzeug mit Begrenzungslinie des Sonderfahrstreifens	Vertikal verlaufende Begrenzungslinie
	Schnittpunkt Ego-Fahrzeug mit Haltlinie	Lateral verlaufende Haltlinie
PT,F	Schnittpunkt Ego-Fahrzeug mit virtueller Haltlinie auf Höhe der vorderen Hindernisbegrenzung	Hinderniserkennung

D Ermittlung der Anforderungen an die maschinelle Umfeldwahrnehmung

D.1 Anforderungen aus dem Szeneriewissen

Tabelle D-1: Erforderliches Szeneriewissen für die Klassen „Kreuzung“ und „Kreisverkehr“

Klasse	Informationsbedarf	Erkennung mittels Umfoldsensorik
Kreuzung	Existenz der Kreuzung (Ende entscheidungsfreie Fahrt)	Fahrbahnmarkierungen, bauliche Begrenzungen (z.B. Borde), Einmündungen
	Vorfahrtsregelung	Fahrbahnmarkierungen, Verkehrszeichen, Lichtsignalanlagen
	Kreuzungstyp (X-, T-, oder Sternkreuzung)	Anzahl der verbundenen Straßenzüge: Fahrbahnmarkierungen, bauliche Begrenzungen (z.B. Borde), Einmündungen
	Anordnung Straßenzüge bezogen auf Ego-Zufahrt	Fahrbahnmarkierungen, bauliche Begrenzungen (z.B. Borde), Einmündungen
	Kreuzungszufahrten	Verkehrszeichen, bauliche Begrenzungen (z.B. Borde), Einmündungen
	Kreuzungsausfahrten	Verkehrszeichen, , bauliche Begrenzungen (z.B. Borde), Einmündungen
	Zulässige Fahrtrichtungen des Ego-Fahrstreifens	Fahrbahnmarkierungen
Kreisverkehr	Existenz des Kreisverkehrs (Ende entscheidungsfreie Fahrt)	Fahrbahnmarkierungen, bauliche Begrenzungen (z.B. Borde), Einmündungen
	Vorfahrtsregelung	Fahrbahnmarkierungen, Verkehrszeichen, Lichtsignalanlagen
	Kreisverkehrszufahrten	Verkehrszeichen, , bauliche Begrenzungen (z.B. Borde), Einmündungen
	Kreisverkehrsausfahrten	Verkehrszeichen, , bauliche Begrenzungen (z.B. Borde), Einmündungen
	Zulässige Fahrtrichtungen des Ego-Fahrstreifens	Fahrbahnmarkierungen

Tabelle D-2: Erforderliches Szeneriewissen für die Klassen „Kreuzender Verkehr“ und „Längsverkehr“

Klasse	Informationsbedarf	Erkennung mittels Umfeldsensorik
Kreuzender Verkehr	Existenz Fußgängerüberweg, Bahnübergang (Ende entscheidungsfreie Fahrt)	Fahrbahnmarkierungen, Verkehrszeichen
	Vorfahrtsregelung	Fahrbahnmarkierungen, Verkehrszeichen, Lichtsignalanlagen
Längsverkehr	Existenz Fahrstreifenende, Sonderfahrstreifen, Hindernis, Lichtsignalanlage	Fahrbahnmarkierungen, Verkehrszeichen, Hindernis, Lichtsignalanlagen
	Zulässige Fahrtrichtung des zu befahrenden Fahrstreifens	Fahrbahnmarkierung, Verkehrsfluss

D.2 Berechnung des Ausrichtungswinkels des Ego-Fahrzeugs am Gate

Der Ausrichtungswinkel α des Ego-Fahrzeugs bezogen auf die Längsrichtung am jeweiligen Gate hat einen Einfluss auf die Informationsverfügbarkeit und eine signifikante Auswirkung auf die Anordnung der Umfeldsensoren. Für die Abschätzung dieses Winkels wird eine Trajektorie entlang eines Viertelkreisbogens mit dem Radius R angenommen. Beim Rechtsabbiegen gilt hierbei die Annahme, dass das Ego-Fahrzeug einer, wie in Abbildung D-1 dargestellt, parallel zur Eckausrundung der Kreuzungseinfahrt verlaufenden Trajektorie folgt. Gemäß der RAS²⁵³ beträgt der einzuhaltende Radius für Eckausrundungen an Kreuzungen innerhalb geschlossener Ortschaften zwischen $R_{RAS,min}=8$ m und $R_{RAS,max}=12$ m. Für die Berechnung der Fahrzeugausrichtung am Gate I,E beziehungsweise I,R ist der erste Schnittpunkt des Ego-Fahrzeugs mit den in Tabelle C-1 angegebenen Grenzlinien zu ermitteln.

²⁵³ Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2006): Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen RAS 06, Abschnitt 6.3.9.2 Eckausrundungen, S.123

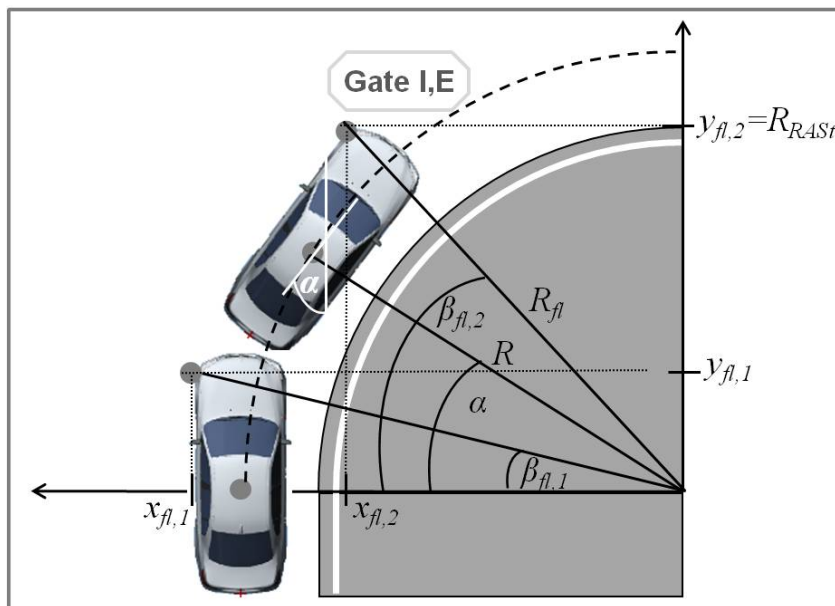


Abbildung D-1: Ausrichtung des Ego-Fahrzeugs am Gate I,E bei Ausführung eines Rechtsabbiegemanövers an einer Kreuzung

Für Gate I,E ist dies der Schnittpunkt der vorderen linken Fahrzeugecke mit der bei $y=R_{RASl}$ verlaufenden lateralen Grenzlinie, für Gate I,R ist dies der Schnittpunkt der vorderen rechten Fahrzeugecke mit der bei $x=R_{RASl}+0,5$ m verlaufenden vertikalen Grenzlinie²⁵⁴. Der gesuchte Mittenwinkel α , der die Bahnkurve des Schwerpunkts bis zum Erreichen des Gates beschreibt, berechnet sich hierbei aus der Differenz der Winkel β_2 , der sich im gleichen Zustand für die Kreisbahn des relevanten Fahrzeuggeckpunkts einstellt, zur Ausgangslage mit dem Winkel β_1 . Für Gate I,E ergibt sich somit:

$$\alpha_{I,E} = \beta_{fl,2} - \beta_{fl,1} = \arctan\left(\frac{R_{RASl}}{\sqrt{R_{fl}^2 - R_{RASl}^2}}\right) - \arctan\left(\frac{l}{2R + w}\right) \text{ mit } R_{fl}^2 = \sqrt{x_{fl,1}^2 + y_{fl,1}^2} \quad (D.1)$$

Das Maximum für α ergibt sich für den Fall einer Trajektorie des Ego-Fahrzeugs mit $R_{RASl,max}$ und maximal negativer Exzentrizität²⁵⁵ innerhalb des Fahrstreifens entlang eines Viertelkreisbogens mit $R=13$ m zu $\alpha_{I,E,max}=48^\circ$. In gleicher Weise lässt sich $\alpha_{I,R,max}=16^\circ$ für $R_{RASl,min}$ und maximal positive Exzentrizität ermitteln. Dieses Vorgehen lässt sich auch auf andere Manöver und Szenarien übertragen. So wird für das Linksabbiegen angenommen, dass sich das Ego-Fahrzeug auf einem Radius bewegt, der der halben Kreuzungsbreite w_l zuzüglich dem Abstand des Fahrzeugmittelpunkts zur linken Fahrstreifengrenze entspricht. Unter Annahme eines Winkels $\alpha_{I,E}=0^\circ$ zu Beginn des Linksabbiegemanövers ergibt sich aus der Berechnung des Schnittpunkts der linken

²⁵⁴ Der in Tabelle C-1 angenommene Abstand von I,R zur rechten Fahrstreifengrenze beträgt 0,5 m.

²⁵⁵ Eine negative Exzentrizität ergibt sich für die Lage des Fahrzeugschwerpunkts rechts von der Fahrstreifenmitte.

vorderen Fahrzeugecke mit der vertikalen Verlängerung der linken Fahrstreifenbegrenzung und der Worst-Case-Annahme einer Kreuzung mit zwei Fahrstreifen pro Richtungsfahrbahn ($R=2w_1-w/2$) zu $\alpha_{I,L,max}=25^\circ$. In Tabelle D-3 sind die auf diese Weise berechneten maximalen Ausrichtungswinkel für den CbW-Szenarienkatalog aufgelistet.

Tabelle D-3: Maximaler Ausrichtungswinkel am Gate

Manöver	Gate	$\alpha_{,max}$
Linksabbiegen Kreuzung	I,L	25°
Rechtsabbiegen Kreuzung	I,E	48°
	I,R	16°
Einfahrt Kreisverkehr ($R= 40$ m)	R,E	67°
Rechtsabbiegen Verkehrsinsel/Bypass	I,R/R,R	58°
Linksabbiegen Wendefahrbahn	I,L	38°

E Evaluierung des Gate-Konzepts

E.1 Anzeigeelement

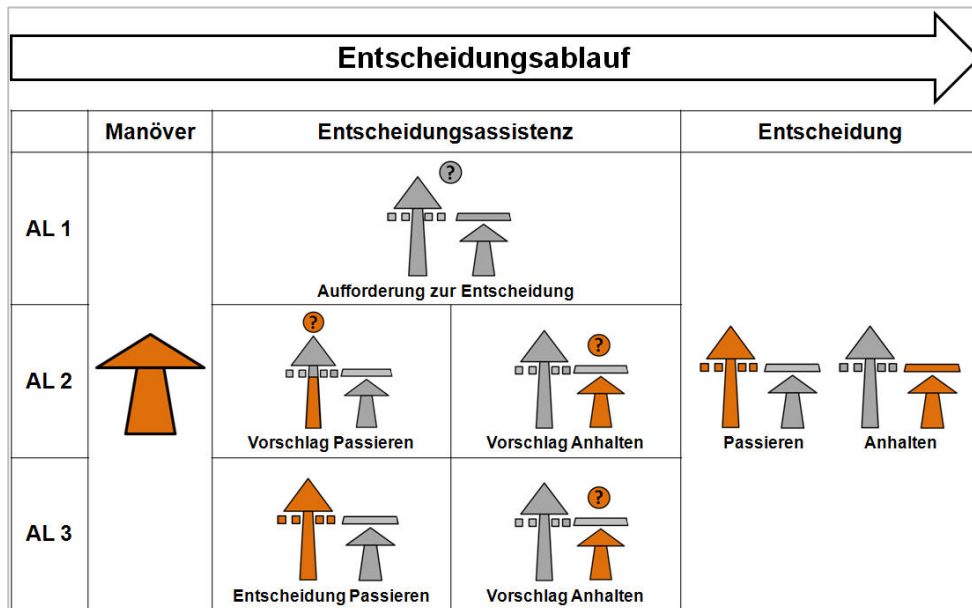


Abbildung E-1: Anzeige der Entscheidungsassistentz im HuD für das Manöver „Kreuzung passieren“

E.2 Probandenbefragung

E.2.1 Technikaffinität

Stimmen Sie folgenden Aussagen zu?

- Elektronische Geräte ermöglichen mir einen hohen Lebensstandard.
- Elektronische Geräte machen mich unabhängig.
- Es macht mir Spaß, ein elektronisches Gerät auszuprobieren.
- Elektronische Geräte erleichtern meinen Alltag.
- Elektronische Geräte erhöhen meine Sicherheit.
- Ich kenne die meisten Funktionen der elektronischen Geräte, die ich besitze.
- Es fällt mir leicht, die Bedienung eines elektronischen Geräts zu erlernen.

Antwortmöglichkeiten: „Stimme voll und ganz zu“, „Stimme zu“, „Stimme weitestgehend zu“, „Stimme eher nicht zu“, „Stimme nicht zu“, „Stimme überhaupt nicht zu“.

E.2.2 Systemeindruck

Fragebogen Teil II	Seite 1 von 3
Probandennr.: _____	Versuchsreihe: _____
Datum: _____	Versuchsblock: _____
<hr/>	
B1: Entsprach die Bewältigung der Szenarien Ihrem eigenen Fahrverhalten?	
<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	
Falls nein, wie hätte sich die Automation verhalten sollen?	_____
<hr/>	
B2: Wussten Sie zu jedem Zeitpunkt, wie sich das Fahrzeug verhalten wird?	
<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	
Falls nein, wann war dies nicht der Fall?	_____
<hr/>	
B3: Hatten Sie zu jedem Zeitpunkt den Eindruck, dass Sie das Fahrzeug kontrollieren können?	
<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	
Falls nein, wann war dies nicht der Fall?	_____
<hr/>	
B4: Konnten Sie das Verhalten der Automation zu jedem Zeitpunkt nachvollziehen?	
<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	
Falls nein, wann war dies nicht der Fall?	_____
<hr/>	
B5: Hatten Sie zu jedem Zeitpunkt das Gefühl, ausreichend Zeit für die Entscheidungsfindung zu haben?	
<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	
Falls nein, in welchen Situationen war dies nicht der Fall?	_____
<hr/>	

Abbildung E-2: Fragebogen zum Systemeindruck, Seite 1

Fragebogen Teil II Seite 2 von 3

B6: Können Sie sich vorstellen, mit einem solchen System im öffentlichen Straßenverkehr zu fahren?

ja nein, weil _____

B7: Würden Sie sich während der Fahrt mit einem solchen System anderen Aufgaben zuwenden?

ja, weil _____

nein, weil _____

B8: Stimmen Sie folgenden Aussagen zu?

Die dargestellten Informationen waren eindeutig.

Stimme voll und ganz zu	Stimme zu	Stimme weitestgehend zu	Stimme eher nicht zu	Stimme nicht zu	Stimme überhaupt nicht zu
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Die dargestellten Informationen haben mich bei der Entscheidungsfindung unterstützt.

Stimme voll und ganz zu	Stimme zu	Stimme weitestgehend zu	Stimme eher nicht zu	Stimme nicht zu	Stimme überhaupt nicht zu
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Die Eingewöhnung in die Bedienung fiel mir leicht.

Stimme voll und ganz zu	Stimme zu	Stimme weitestgehend zu	Stimme eher nicht zu	Stimme nicht zu	Stimme überhaupt nicht zu
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Das Betrachten der Anzeigen lenkte mich ab.

Stimme voll und ganz zu	Stimme zu	Stimme weitestgehend zu	Stimme eher nicht zu	Stimme nicht zu	Stimme überhaupt nicht zu
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Abbildung E-3: Fragebogen zum Systemeindruck, Seite 2

Fragebogen Teil II Seite 3 von 3

Mir war immer klar, welche Fahrzeugreaktionen meine Eingaben hervorrufen werden.

Stimme voll und ganz zu	Stimme zu	Stimme weitest- gehend zu	Stimme eher nicht zu	Stimme nicht zu	Stimme überhaupt nicht zu
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Ich konnte das Verhalten meines Fahrzeugs zu jedem Zeitpunkt kontrollieren.

Stimme voll und ganz zu	Stimme zu	Stimme weitest- gehend zu	Stimme eher nicht zu	Stimme nicht zu	Stimme überhaupt nicht zu
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Das Autofahren wird mit diesem System einfacher.

Stimme voll und ganz zu	Stimme zu	Stimme weitest- gehend zu	Stimme eher nicht zu	Stimme nicht zu	Stimme überhaupt nicht zu
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Das Autofahren wird mit diesem System komfortabler.

Stimme voll und ganz zu	Stimme zu	Stimme weitest- gehend zu	Stimme eher nicht zu	Stimme nicht zu	Stimme überhaupt nicht zu
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Das Autofahren wird mit diesem System sicherer.

Stimme voll und ganz zu	Stimme zu	Stimme weitest- gehend zu	Stimme eher nicht zu	Stimme nicht zu	Stimme überhaupt nicht zu
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Ich wünsche mir ein solches System in meinem eigenen Fahrzeug.

Stimme voll und ganz zu	Stimme zu	Stimme weitest- gehend zu	Stimme eher nicht zu	Stimme nicht zu	Stimme überhaupt nicht zu
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Ich würde mir ein solches System in einem Neuwagen kaufen.

Stimme voll und ganz zu	Stimme zu	Stimme weitest- gehend zu	Stimme eher nicht zu	Stimme nicht zu	Stimme überhaupt nicht zu
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Abbildung E-4: Fragebogen zum Systemeindruck, Seite 3

E.2.3 Nicht szenariogerechtes Verhalten der Automation

Nicht szenariogerechtes Verhalten der Automation		Seite 1 von 1
<hr/>		
Probandennr.:	_____	Versuchsblock: _____
Versuchsreihe:	_____	Versuch: _____
<hr/>		
C1:	Ist Ihnen in der soeben erlebten Situation etwas aufgefallen? Falls ja, was ist Ihnen aufgefallen?	
	<input type="checkbox"/> ja, nämlich _____	
	<input type="checkbox"/> nein [Falls nein, Ende der Befragung]	
<hr/>		
C2:	Wer hat Ihrer Meinung nach in dieser Situation falsch gehandelt?	
	<input type="checkbox"/> Sie selbst <input type="checkbox"/> die Automation <input type="checkbox"/> beide	
<hr/>		
C3:	Hat Sie das Verhalten der Automation überrascht?	
	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	
<hr/>		
C4:	Konnten Sie das Verhalten der Automation nachvollziehen?	
	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	
<hr/>		
C5:	Schätzen Sie die erlebte Situation als sicher oder unsicher ein?	
	<input type="checkbox"/> sicher <input type="checkbox"/> unsicher	
<hr/>		
C6:	Hatten Sie zu jedem Zeitpunkt den Eindruck, dass Sie das Fahrzeug kontrollieren konnten?	
	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein, weil _____	
<hr/>		
C7:	Hatten Sie zu jedem Zeitpunkt das Gefühl, ausreichend Zeit für einen korrigierenden Eingriff zu haben?	
	<input type="checkbox"/> ja nein	

Abbildung E-5: Fragebogen zu Szenarien mit nicht szenariogerechtem Verhalten der Automation

E.2.4 Kollision

Kollision	Seite 1 von 1
<hr/>	
Probandennr.: _____	Versuchsreihe: _____
Datum: _____	Versuchsblock: _____
	Versuchsnr.: _____
<hr/>	
Sie haben soeben eine Kollision mit einem anderen Verkehrsteilnehmer erlebt. Was hat Ihrer Meinung nach dazu geführt? (Mehrfachnennung möglich)	
<input type="checkbox"/> Die Anzeige der Automation hat mich verwirrt.	
<input type="checkbox"/> Die Anzeige der Automation war in der erlebten Situation falsch.	
<input type="checkbox"/> Mir war nicht klar, auf welche Haltelinie sich die Anzeige der Automation bezog.	
<input type="checkbox"/> Die Automation reagierte nicht auf meine Eingabe.	
<input type="checkbox"/> Ich habe mich auf die Anzeige der Automation verlassen.	
<input type="checkbox"/> Ich wusste nicht, was meine Aufgabe in dieser Situation war.	
<input type="checkbox"/> Ich hatte erwartet, dass mein Fahrzeug anhalten würde.	
<input type="checkbox"/> Ich hatte erwartet, dass das andere Fahrzeug anhalten würde.	
<input type="checkbox"/> Ich war mir unsicher, wie sich mein Fahrzeug verhalten würde.	
<input type="checkbox"/> Ich war mir unsicher, wie sich das andere Fahrzeug verhalten würde.	
<input type="checkbox"/> Ich hatte nicht genug Zeit, um rechtzeitig zu reagieren.	
<input type="checkbox"/> Die Fahrsituation war zu unübersichtlich.	
<input type="checkbox"/> Ich habe die Situation falsch eingeschätzt.	
<input type="checkbox"/> Ich habe den anderen Verkehrsteilnehmer übersehen.	
<input type="checkbox"/> Ich habe das Bedienelement versehentlich falsch bedient.	
<input type="checkbox"/> Ich wollte mich noch umentscheiden, es war aber bereits zu spät.	
<input type="checkbox"/> Sonstige _____	
<hr/>	

Abbildung E-6: Fragebogen zu den Ursachen einer Kollision

E.3 Subjektives Kritikalitätsmaß

Tabelle E-1: Probandenindividuelles Kritikalitätsmaß

VPN	Geschlecht	Altersgruppe	$TTI_{\text{kritisch,passieren}}$	$TTI_{\text{kritisch,links}}$	VPN	Geschlecht	Altersgruppe	$TTI_{\text{kritisch,passieren}}$	$TTI_{\text{kritisch,links}}$
1	m	Älter (> 50 Jahre)	9 s	4 s	22	w	Jünger (18-40 Jahre)	3 s	3 s
2	w	Jünger (18-40 Jahre)	3 s	6 s	23	w	Älter (> 50 Jahre)	3 s	3 s
3	m	Jünger (18-40 Jahre)	9 s	6 s	24	m	Jünger (18-40 Jahre)	4 s	3 s
4	m	Jünger (18-40 Jahre)	2 s	4 s	25	w	Älter (> 50 Jahre)	2 s	2 s
5	w	Jünger (18-40 Jahre)	4 s	4 s	26	w	Älter (> 50 Jahre)	3 s	3 s
6	m	Jünger (18-40 Jahre)	6 s	9 s	27	m	Jünger (18-40 Jahre)	3 s	5 s
7	w	Jünger (18-40 Jahre)	3 s	6 s	28	m	Älter (> 50 Jahre)	3 s	3 s
8	w	Jünger (18-40 Jahre)	4 s	4 s	29	w	Älter (> 50 Jahre)	3 s	3 s
9	m	Jünger (18-40 Jahre)	4 s	6 s	30	m	Älter (> 50 Jahre)	5 s	4 s
10	m	Jünger (18-40 Jahre)	5 s	4 s	31	m	Älter (> 50 Jahre)	3 s	3 s
11	m	Jünger (18-40 Jahre)	4 s	4 s	32	m	Jünger (18-40 Jahre)	3 s	3 s
12	m	Älter (> 50 Jahre)	4 s	2 s	33	m	Älter (> 50 Jahre)	4 s	3 s
13	w	Älter (> 50 Jahre)	6 s	9 s	34	w	Älter (> 50 Jahre)	1 s	3 s
14	m	Jünger (18-40 Jahre)	7 s	5 s	35	w	Jünger (18-40 Jahre)	5 s	6 s
15	m	Älter (> 50 Jahre)	4 s	2 s	36	m	Älter (> 50 Jahre)	3 s	4 s
16	m	Älter (> 50 Jahre)	8 s	8 s	37	m	Jünger (18-40 Jahre)	4 s	4 s
17	w	Jünger (18-40 Jahre)	4 s	6 s	38	w	Jünger (18-40 Jahre)	3 s	3 s
18	m	Jünger (18-40 Jahre)	8 s	6 s	39	w	Älter (> 50 Jahre)	1 s	2 s
19	w	Älter (> 50 Jahre)	4 s	6 s	40	m	Älter (> 50 Jahre)	3 s	3 s
20	w	Jünger (18-40 Jahre)	4 s	6 s	41	m	Jünger (18-40 Jahre)	2 s	2 s
21	m	Jünger (18-40 Jahre)	3 s	2 s	42	m	Jünger (18-40 Jahre)	4 s	8 s

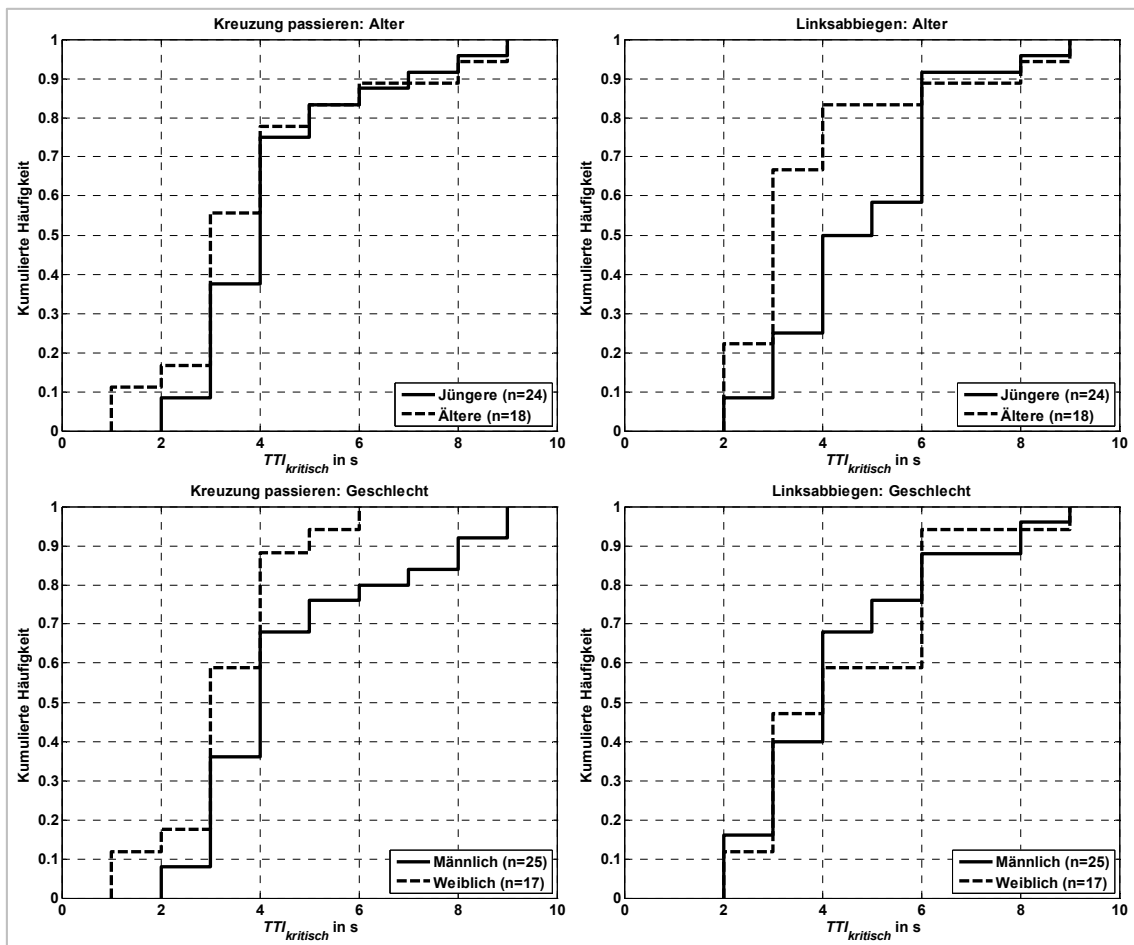


Abbildung E-7: Verteilung des subjektiven Kritikalitätsmaßes für die verschiedenen Merkmalsausprägungen des Probandenkollektivs

Tabelle E-2: Signifikanzuntersuchung mit Wilcoxon-Rangsummentest (signifikantes Ergebnis hervorgehoben)

Merkmalsausprägung	p-Wert	Manöver	Merkmal	p-Wert	Signifikanz
Geschlecht	m	Linksabbiegen	Geschlecht	0,84	
	w		Alter	0,02	*
Alter	jünger	Kreuzung passieren	Geschlecht	0,06	
	älter		Alter	0,34	

Literaturverzeichnis

Abendroth, B.: Gestaltungspotentiale für ein PKW-Abstandsregelsystem unter Berücksichtigung verschiedener Fahrertypen. Ergonomia Verlag, Stuttgart, 2001

Aeberhard, M.; Paul, S.; Kaempchen, N.; Bertram, T.: Object Existence Probability Fusion using Dempster-Shafer Theory in a High-Level Sensor Data Fusion Architecture. 2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. 05.-09. Juni 2011 in Baden-Baden, 2011

Bartels, A.; To, T.; Karrenberg, S.; Weiser, A.: Hochautomatisiertes Fahren auf der Autobahn. In: ATZ Automobiltechnische Zeitschrift, Band 113, Nr. 09/2011, S. 652-657, 2011

Bauer, E.; Lotz, F.; Pfromm, M.; Schreier, M.; Cieler, S.; Eckert, A.; Hohm, A.; Lüke, S.; Rieth, P.; Abendroth, B.; Willert, V.; Adamy, J.; Bruder, R.; Konigorski, U.; Winner, H.: PRORETA 3: An Integrated Approach to Collision Avoidance and Vehicle Automation. In: at-Automatisierungstechnik, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, Band 60, Nr. 12/2012, S. 755-765, 2012

Bayouth, M.; Nourbakhsh, I.; Thorpe, C.: A Hybrid Human-Computer Autonomous Vehicle Architecture. Third ECPD International Conference on Advanced Robotics, Intelligent Automation and Control. 15.-17. September 1997 in Bremen, 1997

Benda, H. v.: Klassifikation von Verkehrssituationen aus Fahrersicht. Bericht zum Forschungsprojekt 7320. In: Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrg.): Forschungsberichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Bereich Unfallforschung, Bericht Nr. 116, 1977

Bengler, K.; Flemisch, F.: Von H-Mode zur kooperativen Fahrzeugführung - Grundlegende ergonomische Fragestellungen. In: Bruder, R.; Winner, H. (Hrsg.): Zukunft der Fahrzeugführung kooperativ oder autonom? 5. Darmstädter Kolloquium Mensch + Fahrzeug. Ergonomia Verlag, Stuttgart, 2011

Bengler, K.; Mayser, C.: Probandenversuche zur Beurteilung von Fahrerinformationssystemen und Fahrerassistenzsystemen - Lerneffekte und Lösungsansätze. In: Landau, K.; Winner, H. (Hrsg.): Fahrversuche mit Probanden - Nutzwert und Risiko. Fortschritt-Bericht VDI Reihe 12 Nr. 557, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2003

Benmimoun, M.; Fahrenkrog, F.; Pütz, A.; Zlocki, A.; Eckstein, L.: Wirkungsanalyse von ACC und FCW auf Grundlage von CAN-Daten im Rahmen eines Feldversuchs. 8. Workshop Fahrerassistenzsysteme 2012. 26.-28. September 2012 in Walting im Altmühltal, 2012

- Berndt, H.; Wender, S.; Dietmayer, K.:** Driver Braking Behavior during Intersection Approaches and Implications for Warning Strategies for Drivers Assistant Systems. 2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. 13.-15. Juni 2007 in Istanbul, Türkei, 2007
- Bertozzi, M.; Bombini, L.; Broggi, A.; Buzzoni, M.; Cardarelli, E.; Cattani, S.; Cerri, P.; Coati, A.; Debattisti, S.; Falzoni, A.; Fedriga, R. I.; Felisa, M.; Gatti, L.; Giacomazzo, A.; Grisleri, P.; Laghi, M. C.; Mazzei, L.; Medici, P.; Panciroli, M.; Porta, P. P.; Zani, P.; Versari, P.:** VIAC: an Out of Ordinary Experiment. 2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. 05.-09. Juni 2011 in Baden-Baden, 2011
- Biester, L.:** Der Einsatz von Kooperation zwischen Mensch und Maschine im Kraftfahrzeug. In: VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik (Hrsg.): Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme. S. 263-278, VDI-Verlag, 2004
- Bishop, R.:** Intelligent vehicle technology and trends. Artech House, Boston, MA, 2005
- Bortz, J.:** Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler. 6. Auflage. Springer Medizin Verlag, Heidelberg, 2005
- Bubb, H.:** Wie viele Probanden braucht man für allgemeine Erkenntnisse aus Fahrversuchen? In: Landau, K.; Winner, H. (Hrsg.): Fahrversuche mit Probanden - Nutzwert und Risiko. Fortschritt-Bericht VDI Reihe 12 Nr. 557, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2003
- Buehler, M.; Iagnemma, K.; Singh, S.:** The DARPA Urban Challenge Autonomous Vehicles in City Traffic. Springer Tracts in Advanced Robotics 56. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 2009
- Buld, S.; Krüger, H.:** Wirkungen von Assistenz und Automation auf Fahrerzustand und Fahrsicherheit. Abschlussbericht Projekt EMPHASIS. 2002
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung:** Straßenverkehrs-Ordnung. 2010
- Buxbaum, B.; Hagebeuker, B.; Lange, R.; Ringbeck, T.:** 3D Time-of-Flight (ToF). In: Winner, H.; Hakuli, S.; Wolf, G. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. 2. Auflage. S. 187-197. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012
- Car2Car Communication Consortium:** European vehicle manufacturers working hand in hand on deployment of cooperative Intelligent Transport Systems and Services (C-ITS). Pressemitteilung vom 10. Oktober 2012.
- Cassavaugh, N. D.; Domeyer, J. E.; Backs, R. W.:** The effect of age on decision making during unprotected turns across oncoming traffic. Fifth International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design. 22.-25. Juni 2009 in Big Sky, MT, USA, 2003

Christoffersen, K.; Woods, D. D.: How to make Automated Systems Team Players. In: Advances in Human Performance and Cognitive Engineering Research, Nr. 2, S. 1-12, 2002

Classen, T.; Wilhelm, U.; Kornhaas, R.; Klar, M.; Lucas, B.: Systemarchitektur für eine 360 Grad Fahrerassistenzsensorik. 8. Workshop Fahrerassistenzsysteme 2012. 26.-28. September 2012 in Walting im Altmühltal, 2012

Claudy, C.: The Motor Car of the Future. In: Scientific American, Band 118, Nr. 1, S. 27-28, 1918

Cliff, W. E.; Bowler, J. J.: The Measured Rolling Resistance of Vehicles for Accident Reconstruction. SAE Technical Paper No. 980368, 1998

Continental: Continental übernimmt Spezialunternehmen für 360 Grad-Umfelderfassung ASL Vision. Pressemitteilung vom 11.01.2013.

Continental: Datenblatt MFC 2 Kamera.

http://www.conti-online.com/generator/www/de/de/continental/industrial_sensors/themes/download/mfc_2_datenblatt_091216_de.pdf, Zugriff Februar 2013

Damböck, D.; Farid, M.; Tönert, L.; Bengler, K.: Übernahmezeiten beim hochautomatisierten Fahren. 5. Tagung Fahrerassistenz. 15.-16. Mai 2012 in München, 2012

Darms, M.: Eine Basis-Systemarchitektur zur Sensordatenfusion von Umfeldsensoren für Fahrerassistenzsysteme. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Nr. 653, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2007

Deuschle, S.; Keßler, G. C.; Hakenberg, M.; Abel, D.: Das KONVOI Projekt - Entwicklung und Untersuchung des Einsatzes von Lkw-Konvois. 6. Workshop Fahrerassistenzsysteme 2009. 28.-30. September 2009 in Löwenstein, 2009

Dickmanns, E.: Untersuchungen und Arbeitsschritte zum Thema künstliche Intelligenz: Rechnersehen und -steuerung dynamischer Systeme. Techn. Ber., UniBwM, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik, 1980

Dietmayer, K.; Kaempchen, N.; Fürstenberg, K.; Kibbel, J.; Schulz, J.; Justus, W.: Roadway Detection and Lane Detection using Multilayer Laserscanner. 9th International Forum on Advanced Microsystems for Automotive Applications. 17./18. März 2005 in Berlin, 2005

Dietmayer, K.; Kirchner, A.; Kämpchen, N.: Fusionsarchitekturen zur Umfeldwahrnehmung für zukünftige Fahrerassistenzsysteme. In: Maurer, M.; Stiller, C. (Hrsg.): Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung. S. 58-88, Springer Verlag, Berlin, 2005

DIN 66050: Gebrauchstauglichkeit. 1980

- Domsch, C.; Negele, H.:** Einsatz von Referenzfahrsituationen bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen. 3. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz. 7.-8. April in Garching, 2008
- Donges, E.:** Aspekte der aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen. In: Automobil-Industrie, Nr. 2, S. 183-190, 1982
- Donges, E.:** Fahrerhaltensmodelle. In: Winner, H.; Hakuli, S.; Wolf, G. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. 2. Auflage. S. 15-23, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012
- Duchow, C.:** A marking-based, flexible approach to intersection detection. 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition CVP 2005. 20.-26. Juni 2005 in San Diego, CA, USA, 2005
- Edwards, C.; Creaser, J.; Caird, J.; Lamsdale, A.:** Older and younger driver performance at complex intersections: implications for using perception-response time and driving simulation. Second International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design. 27.-30. Juni 2003 in Park City, UT, USA, 2003
- Einhaus, J.; Hermes, C.; Hahn, M.; Wöhler, C.; Kummert, F.:** Tracking und Bewegungsvorhersage von Fahrzeugen in komplexen Innenstadtszenarien. 4. Tagung Sicherheit durch Fahrerassistenz. 15.-16. April 2010 in München, 2010
- Endsley, M. R.:** Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems. In: Human Factors, Band 37, Nr. 1, S. 32-64, 1995
- Fastenmeier, W.:** Die Verkehrssituation als Analyseeinheit im Verkehrssystem. In: Fastenmeier, W. (Hrsg.): Autofahrer und Verkehrssituation. S. 27-78, Verl. TÜV Rheinland [u.a.], Köln, 1995
- Fastenmeier, W.:** Situationsspezifisches Fahrverhalten und Informationsbedarf verschiedener Fahrergruppen. In: Fastenmeier, W. (Hrsg.): Autofahrer und Verkehrssituation. S. 141-179, Verl. TÜV Rheinland [u.a.], Köln, 1995
- Fastenmeier, W.; Gstalter, H.:** Anforderungsgerechtes Autofahren: wie zuverlässig sind jüngere und ältere Autofahrer? Fahrer im 21. Jahrhundert: der Mensch als Fahrer und seine Interaktion mit dem Fahrzeug. 22./23. November 2005 in Braunschweig, 2005
- Fastenmeier, W.; Gstalter, H.:** Driving task analysis as a tool in traffic safety research and practice. In: Safety Science, Elsevier, Band 45, Nr. 9, S. 952-979, 2007
- Felisa, M.; Zani, P.:** Robust monocular lane detection in urban environments. 2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. 21.-24. Juni 2010 in San Diego, CA, USA, 2010

Fitzek, F.; Zoeke, M. A.; Rasshofer, R. H.: Side Object Tracking Using Automotive Radar With Lateral Velocity Estimation. 8th International Workshop on Intelligent Transportation (WIT 2011). 22./23. März 2011 in Hamburg, 2011

Flemisch, F. O.; Adams, C. A.; Conway, S. R.; Goodrich, K. H.; Palmer, M. T.; Schutte, P. C.: The H-Metaphor as a guideline for vehicle automation and interaction. NASA/TM-2003-212672. Langley Research Center, Hampton, Virginia, 2003

Flemisch, F.; Schomerus, J.; Kelsch, J.; Schmuntzsch, U.: Vom Fahrer zum Reiter? Zwischenbericht 2005 auf dem Weg von der H- Metapher zum H-Mode für Bodenfahrzeuge. In: VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik (Hrsg.): Fahrer im 21. Jahrhundert - Der Mensch als Fahrer und seine Interaktion mit dem Fahrzeug. S. 63-74, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2005

Flemisch, F.; Grieschke, S.; Heesen, M.; Kaussner, A.; Niemann, J.; Petermann, I.; Schieben, A.; Schoemig, N.: Validation of preliminary design by simulation. HAVEit Deliverable 33.3, 2009

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): Richtlinie für die Anlage von Straßen. Teil: Knotenpunkte (RAS-K), Abschnitt 1: Plangleiche Knotenpunkte (RAS-K-1), Ausgabe 1988, 1988

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): Richtlinien für Markierung von Straßen RMS. Teil 1: Abmessungen und geometrische Anordnung von Markierungszeichen. Ausgabe 1993, 1993

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen RASSt 06. Ausgabe 2006, 2006

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): Richtlinien für Lichtsignalanlagen RiLSA. Lichtzeichenanlagen für den Straßenverkehr. Ausgabe 2010, 2010

Franke, U.; Rabe, C.; Badino, H.; Gehrig, S.: 6D-Vision: Fusion of Stereo and Motion for Robust Environment Perception. DAGM Symposium 2005. 30.08.-02.09.2005 in Wien, 2005

Franke, U.; Rabe, C.; Gehrig, S.; Badino, H.; Barth, A.: Dynamic Stereo Vision for Intersection Assistance. FISITA World Automotive Congress. 14.-19. September 2008 in München, 2008

Franz, B.; Schreiber, M.; Kauer, M.; Geyer, S.; Bruder, R.: Konzeption eines kontaktanalogen Head-up-Displays für Fahrerassistenzsysteme am Beispiel Conduct-by-Wire. GfA-Frühjahrskongress 2011. 23.-25. März 2011 in Chemnitz, 2011

- Franz, B.; Kauer, M.; Blanke, A.; Schreiber, M.; Bruder, R.; Geyer, S.:** Comparison of two human-machine-interfaces for cooperative maneuver-based driving. In: *Work: A Journal of Prevention, Assessment and Rehabilitation*, Band 41, Nr. 1, S. 4192-4199, 2012
- Franz, B.; Kauer, M.; Bruder, R.; Geyer, S.:** pieDrive – a New Driver-Vehicle Interaction Concept for Maneuver-Based Driving. 2012 International IEEE Intelligent Vehicles Symposium Workshops. 3. Juni 2012 in Alcalá de Henares, Spanien, 2012
- Frenz, W.; Casimir-van den Broek, E.:** Völkerrechtliche Zulässigkeit von Fahrerassistenzsystemen. In: *Neue Zeitschrift für Verkehrsrecht*, Nr. 11, S. 529-534, 2009
- Fuchs, J.:** Beitrag zum Verhalten von Fahrer und Fahrzeug bei Kurvenfahrt. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Nr. 184, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1993
- Galsterer, H.:** Belastung und Beanspruchung von Kraftfahrern. 1. Teil: Die Analyse verschiedener Verkehrssituationen als Basis zur Beanspruchungsmessung. In: Hoyos, C. G. (Hrg.): *Berichte aus dem Institut für Psychologie und Erziehungswissenschaft*, Technische Universität München, Bericht Nr. 5, 1979
- Gasser, T. M.; Arzt, C.; Ayoubi, M.; Bartels, A.; Bürkle, L.; Eier, J.; Flemisch, F.; Häcker, D.; Hesse, T.; Huber, W.; Lotz, C.; Maurer, M.; Ruth-Schumacher, S.; Schwarz, J.; Vogt, W.:** Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen*. Heft F 83, 2012
- Gasser, T.:** Ergebnisse der Projektgruppe Automatisierung: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung. 5. Tagung Fahrerassistenz. 15.-16. Mai 2012 in München, 2012
- Geyer, S.; Hakuli, S.; Winner, H.; Franz, B.; Kauer, M.:** Development of a Cooperative System Behavior for a Highly Automated Vehicle Guidance Concept based on the Conduct-by-Wire Principle. 2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. 05.-09. Juni 2011 in Baden-Baden, 2011
- Geyer, S.; Hakuli, S.; Winner, H.; Franz, B.; Kauer, M.:** Ermittlung der Anforderungen an die Umfelderkennung für Conduct-by-Wire. 5. Tagung Fahrerassistenz. 15.-16. Mai 2012 in München, 2012
- Geyer, S.:** Maneuver-based vehicle guidance based on the Conduct-by-Wire principle. In: Maurer, M.; Winner, H. (Hrsg.): *Automotive Systems Engineering*. Springer Verlag, Berlin u.a., 2013
- Geyer, S.; Baltzer, M.; Franz, B.; Hakuli, S.; Kauer, M.; Kienle, M.; Meier, S.; Weißgerber, T.; Bengler, K.; Bruder, R.; Flemisch, F. O.; Winner, H.:** Concept and Development of a Unified Ontology for Generating Test and Use Case Catalogues for Assisted and Automated Vehicle Guidance. In: *IET Intelligent Transport Systems*. Zur Veröffentlichung angenommen, 2013

Glaser, S.; Vanholme, B.; Mammari, S.; Gruyer, D.; Nouvelière, L.: Maneuver-Based Trajectory Planning for Highly Autonomous Vehicles on Real Road With Traffic and Driver Interaction. In: IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Band 11, Nr. 3, S. 589-606, 2010

Gnatzig, S.; Haas, E.; Lienkamp, M.: Die Teleoperation als Ansatz zur fahrerlosen Fahrzeugführung. 5. Tagung Fahrerassistenz. 15.-16. Mai 2012 in München, 2012

Godley, S. T.; Triggs, T. J.; Fildes, B. N.: Driving simulator validation for speed research. In: Accident Analysis and Prevention, Band 34, S. 589-600, 2002

Green, M.: How Long Does It Take to Stop? In: Transportation Human Factors, Band 2, Nr. 3, S. 195-216, 2000

Greenberg, J.; Curry, R.; Bloomer, M.; Kozak, K.; Artz, B.; Cathey, L.; Kao, B.: The validity of last-second braking and steering judgments in advanced driving simulators. Driving Simulator Conference 2006. Oktober 2006 in Paris, Frankreich, 2006

Gruber, S.; Ocvirk, N.; Remfrey, J.: Bremssysteme. In: Braess, H.; Seiffert, U. (Hrsg.): Vieweg Handbuch Kraftfahrzeuge. 6. Auflage. S. 492-533, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012

Gwehenberger, J.: Sicherheitsgewinn durch Fahrerassistenzsysteme: Aktuelle Erkenntnisse aus Schadenakten der Allianz. 4. Tagung Sicherheit durch Fahrerassistenz. 15.-16. April 2010 in München, 2010

Habenicht, S.: Entwicklung und Evaluation eines manöverbasierten Fahrstreifenwechsellassistenten. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Nr. 756, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2012

Hakuli, S.; Kluin, M.; Geyer, S.; Winner, H.: Development and Validation of Manoeuvre-Based Driver Assistance Functions for Conduct-by-Wire with IPG CarMaker. FISITA 2010 World Automotive Congress. 30. Mai - 04. Juni 2010 in Budapest, Ungarn, 2010

Hakuli, S.; Geyer, S.; Winner, H.; Henning, J.: Integriertes Konzept für die manöverbasierte Fahrerassistenz. In: ATZ Automobiltechnische Zeitschrift, Band 03/2011, S. 220-223, 2011

Hakuli, S.; Bruder, R.; Flemisch, F. O.; Löper, C.; Rausch, H.; Schreiber, M.; Winner, H.: Kooperative Automation. In: Winner, H.; Hakuli, S.; Wolf, G. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. 2. Auflage. S. 641-650. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012

Hargutt, V.; Krüger, H.: Die Gefahr der Unterforderung? Selbstregulation der Aktivierung in der Fahrsimulation. Der Fahrer im 21. Jahrhundert. 03./04. Mai 2001 in Berlin, 2001

- Hartung, J.; Elpelt, B.; Klösener, K. :** Statistik: Lehr und Handbuch der angewandten Statistik. 14. Auflage. Oldenbourg Verlag, München, 2005
- Heesen, M.; Kelsch, J.; Löper, C.; Flemisch, F.:** Haptisch-multimodale Interaktion für hochautomatisierte, kooperative Fahrzeugführung bei Fahrstreifenwechsel-, Brems- und Ausweichmanövern. 11. Braunschweiger Symposium AAE). 10./11. Februar 2010 in Braunschweig, 2010
- Heesen, M.; Baumann, M.:** Rückmeldung von Automations(un)sicherheit als Möglichkeit zur Verbesserung der Kontrollierbarkeit von Automationsfehlern bei hoch- bzw. teilautomatisiertem Fahren. 8. Workshop Fahrerassistenzsysteme 2012. 26.-28. September 2012 in Walting im Altmühltal, 2012
- Hermes, C.; Einhaus, J.; Hahn, M.; Wöhler, C.; Kummert, F.:** Vehicle Tracking and Motion Prediction in Complex Urban Scenarios. 2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. 21.-24. Juni 2010 in San Diego, CA, USA, 2010
- Herzog, B.; Schmidt, M.:** Laserprojektion. In: ATZ elektronik, Nr. 3, S. 18-24, 2008
- Hoeger, R.; Zeng, H.; Hoess, A.; Kranz, T.; Boverie, S.; Strauss, M.; Jakobsson, E.; Beutner, A.; Bartels, A.; To, T.; Stratil, H.; Fürstenberg, K.; Ahlers, F.; Frey, E.; Schieben, A.; Mosebach, H.; Flemisch, F.; Dufaux, A.; Manetti, A.; Mantzouranis, I.; Lepke, H.; Szalay, Z.; Szabo, B.; Luithardt, P.; Gutknecht, M.; Schoemig, N.; Kaussner, A.; Nashashibi, F.; Resende, P.; Vanholme, B.:** HAVEit Final report. 2011
- Hörwick, M.; Siedersberger, K.:** Strategy and Architecture of a Safety Concept for Fully Automatic and Autonomous Driving Assistance Systems. 2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. 21.-24.06.2010 in San Diego, 2010
- Hoffmann, S.; Buld, S.:** Darstellung und Evaluation eines Trainings zum Fahren in der Fahrsimulation. 22. Internationale VDI/VW-Gemeinschaftstagung Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme. 12./13. Oktober 2006 in Wolfsburg, 2006
- Hohm, A.:** Umfeldklassifikation und Identifikation von Überholzielen für ein Überholassistentensystem. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Nr. 727, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2010
- Holzmann, F.:** Adaptive Cooperation between Driver and Assistant System. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2008
- Hummel, T.; Kühn, M.; Bende, J.; Lang, A.:** Advanced Driver Assistance Systems. An investigation of their potential safety benefits based on an analysis of insurance claims in Germany. German Insurance Association Insurers Accident Research, Research report FS 03, 2011

Hurich, W.: Koordiniertes Automatisiertes Fahren zum Entwickeln, Prüfen und Absichern von Assistenzsystemen. 10. Braunschweiger Symposium AAET 2009. 11./12. Februar 2009 in Braunschweig, 2009

Ibeo Automotive: ibeo Lux Salesblatt.

<http://www.ibeo-as.com/images/stories/pdf/neu/salesblatt%20lux.pdf>, Zugriff Februar 2013

ISO 15622 : Transport information and control systems - Adaptive Cruise Control Systems - Performance requirements and test procedures. 2002

Jäger, H.: Autonomes System für fahrerloses Testing. 10. Braunschweiger Symposium AAET 2009. 11./12. Februar 2009 in Braunschweig, 2009

Jamson, A. H.: Driving Simulation validity: Issues of Field of View and Resolution. Driving Simulation Conference 2000 (DSC 2000). 04.-06. September 2000 in Paris, Frankreich, 2000

Jiminez, F.; Naranjo, J.; Garcia, F.; Zato, J.; Armingol, J.; de la Escalera, A.; Aparicio, F.: Limitations of positioning systems for developing digital maps and locating vehicles according to the specifications of future driver assistance systems. In: IET Intelligent Transport Systems, The Institution of Engineering and Technology, Band 5, Nr. 1, S. 60-69, 2011

Kalbfleisch, J.: Übertragung des menschlichen Fahrerverhaltens an Entscheidungspunkten auf das Verhalten der Conduct-by-Wire-Automation. Bachelor-Thesis Nr. 1120/12, Fachgebiet Fahrzeugtechnik, Technische Universität Darmstadt, 2012

Kämpchen, N.; Waldmann, P.; Homm, F.; Ardelt, M.: Umfelderkennung für den Nothalteassistenten - ein System zum automatischen Anhalten bei plötzlich reduzierter Fahrfähigkeit des Fahrers. 11. Braunschweiger Symposium AAET 2010. 10./11. Februar 2010 in Braunschweig, 2010

Karg, M.: Zeitliche Analyse der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion bei Conduct-by-Wire. Bachelor-Thesis Nr. 1092/11, Fachgebiet Fahrzeugtechnik, Technische Universität Darmstadt, 2011

Kastner, R.; Michalke, T.; Adamy, J.; Fritsch, J.; Goerick, C.: Task-based environment interpretation and system architecture for next generation ADAS. In: IEEE Intelligent Transportations Systems Magazine, Band 3, Nr. 4, S. 20-33, 2011

Kauer, M.; Schreiber, M.; Hakuli, S.; Bruder, R.: Akzeptanz manöverbasierter Fahrzeugführungskonzepte am Beispiel von Conduct-by-Wire. 5. VDI Fachtagung USEWARE 2010. 13./14. Oktober 2010 in Baden-Baden, 2010

- Kauer, M.; Schreiber, M.; Franz, B.; Hakuli, S.; Geyer, S.; Eggers, D.; Bruder, R.:** Nutzungsszenarien der manöverbasierten Fahrzeugführung. GfA-Frühjahrskongress 2011. 23.-25. März 2011 in Chemnitz, 2011
- Kauer, M.; Franz, B.; Schreiber, M.; Bruder, R.; Geyer, S.:** User acceptance of cooperative maneuver-based driving – a summary of three studies. In: *Work: A Journal of Prevention, Assessment and Rehabilitation*, Band 41, Nr. 1, S. 4258-4264, 2012
- Kelsch, J.; Flemisch, F. O.; Löper, C.; Schieben, A.; Schindler, J.:** Links oder rechts, schneller oder langsamer? Grundlegende Fragestellungen beim Cognitive Systems Engineering von hochautomatisierter Fahrzeugführung. In: Grandt, M.; Bauch, A. (Hrsg.): *Cognitive Systems Engineering in der Fahrzeug- und Prozessführung*; 48. FAS Anthropotechnik. Karlsruhe, 2006
- Kempen, B.:** Fahrerassistenz und Wiener Weltabkommen. SVT 2008 3. Sachverständigentag von TÜV und DEKRA: Mehr Sicherheit durch moderne Technologien. 25./26. Februar 2008 in Berlin, 2008
- Kienle, M.; Damböck, D.; Kelsch, J.; Flemisch, F.; Bengler, K.:** Towards an H-Mode for highly automated vehicles: driving with side sticks. 1st International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications AutomotiveUI '09. 21./22. September 2009 in Essen, 2009
- Klanner, F.:** Entwicklung eines kommunikationsbasierten Querverkehrsassistenten im Fahrzeug. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Nr. 685, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2008
- Klanner, F.; Thoma, S.; Winner, H.:** Fahrerhaltensuntersuchungen und Mensch-Maschine-Interaktionskonzepte für die Kreuzungsassistenz. 3. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz. 07./08. April 2008 in Garching, 2008
- Kleine-Besten, T.; Kersken, U.; Pöchmüller, W.; Schepers, H.:** Navigation und Telematik. In: Winner, H.; Hakuli, S.; Wolf, G. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. 2. Auflage. S. 599-624, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012
- König, W.:** Nutzergerechte Entwicklung der Mensch-Maschine-Interaktion von Fahrerassistenzsystemen. In: Winner, H.; Hakuli, S.; Wolf, G. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. 2. Auflage. S. 33-42, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012
- Korzenietz, P.:** Requirement analysis for a universal system architecture for ecological and economical driver assistance systems. In: Maurer, M.; Winner, H. (Hrsg.): *Automotive Systems Engineering*. Springer Verlag, Berlin u.a., 2013
- Kühn, M.; Hummel, T.; Bende, J.:** Benefit Estimation of Advanced Driver Assistance Systems for Cars Derived from Real-Life Accidents. 21st International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles ESV 2009. 15.-18. Juni 2009 in Stuttgart, 2009

Langer, D.; Funke, J.; Theodosis, P.; Hindiyeh, R.; Kritatakirana, K.; Gerdes, C.; Müller-Bessler, B.; Huhnke, B.; Hernandes, M.; Stanek, G.: Up to the Limits: Autonomous Audi TTS. 2012 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. 03.-07. Juni 2012 in Alcalá de Henares, Spanien, 2012

Levinson, J.; Askeland, J.; Becker, J.; Dolson, J.; Held, D.; Kammel, S.; Kolter, J.; Langer, D.; Pink, O.; Pratt, V.; Sokolsky, M.; Stanek, G.; Stavens, D.; Teichmann, A.; Werling, M.; Thrun, S.: Towards Fully Autonomous Driving: Systems and Algorithms. 2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. 05.-09. Juni 2011 in Baden-Baden, 2011

Löper, C.; Kelsch, J.; Flemisch, F. O.: Kooperative, manöverbasierte Automation und Arbitrierung als Bausteine für hochautomatisiertes Fahren. 9. Braunschweiger Symposium AAET. 13./14. Februar 2008 in Braunschweig, 2008

Luczak, H.: Untersuchungen informatorischer Belastung und Beanspruchung des Menschen. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 10 Nr. 2, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1975

Mages, M.: Top-Down-Funktionsentwicklung eines Einbiege- und Kreuzenassistenten. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Nr. 694, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2009

Markoff, J.: Google Cars Drive Themselves, in Traffic. In: The New York Times, 10. Oktober 2010, S. A1, 2010

Maurer, M.: Flexible Automatisierung von Straßenfahrzeugen mit Rechnersehen. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Nr. 443, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2000

Meyer, O.; Didier, M.: Driver behavior during left turn - a field and a simulator experiment. Annual Spring Conference of the GfA. 07.-09. Mai 2003 in München, 2003

Moray, N.; Inagaki, T.; Itoh, M.: Adaptive Automation, Trust, and Self-Confidence in Fault Management of Time-Critical Tasks. In: Journal of Experimental Psychology: Applied, Band 6, Nr. 1, S. 44-58, 2000

Müller, A.; Wünsche, H.: GIS-basierte topologische Fahrzeuglokalisierung durch LIDAR Kreuzungserkennung. 5. Tagung Fahrerassistenz. 15.-16. Mai 2012 in München, 2012

Muffert, M.; Milbich, T.; Pfeiffer, D.; Franke, U.: May I Enter the Roundabout? A Time-To-Contact Computation Based on Stereo-Vision. 2012 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. 03.-07. Juni 2012 in Alcalá de Henares, Spanien, 2012

Nedeveschi, S.; Propescu, V.; Danescu, R.; Marita, T.; Oniga, F.: Accurate Ego-Vehicle Global Localization at Intersections Through Alignment of Visual Data With Digital Map. In: IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Band PP, Nr. 99, S. 1-15, 2012

- Neuendorf, N.; Knorr, R.; Kulp, K.; Lenz, A.:** Pilot-in-the-loop - Auf dem Weg zum "artificial co-pilot" im Automobil. 2. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz. 04./05. April 2006 in München, 2006
- Nof, S. Y.:** Automation: What It Means to Us Around the World. In: Nof, S. Y. (Hrsg.): Springer handbook of automation. S. 13-52, Springer, Berlin [u.a.], 2009
- Noll, M.; Rapps, P.:** Ultraschallsensorik. In: Winner, H.; Hakuli, S.; Wolf, G. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. 2. Auflage. S. 110-122, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012
- Olson, P. L.; Farber, E. :** Forensic aspects of driver perception and response. Lawyers & Judges Publishing Company, Inc., Tucson, AZ, United States, 2003
- Owens, J. M.; Lehman, R.:** The effects of age and distraction on reaction time in a driving simulator. First International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design. 14.-17. August 2001 in Aspen, CO, USA, 2001
- Plavsic, M.:** Analysis and Modeling of Driver Behavior for Assistance Systems at Road Intersections. 2010
- Plavsic, M.; Klinker, G.; Bubb, H.:** Situation Awareness Assessment in Critical Driving Situations at Intersections by Task and Human Error Analysis. In: Human Factors in Ergonomics & Manufacturing, Band 20, Nr. 3, S. 177-191, 2010
- Popper, K. R.:** Logik der Forschung. 10. Auflage. Mohr Siebeck, Tübingen, 2005
- Quaiser-Pohl, C.; Jordan, K.:** Warum Frauen glauben, sie könnten nicht einparken - und Männer ihnen Recht geben. Über Schwächen, die gar keine sind. Deutscher Taschenbuchverlag, München, 2007
- Ranney, T. A.:** Models of driving behavior: a review of their evolution. In: Accident Anal. and Prev., Elsevier Science Ltd., Band 26, Nr. 6, S. 733-750, 1994
- Rasmussen, J.:** Skills, Rules, and Knowledge; Signals, Signs, and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models. In: IEEE Transactions On Systems, Man, and Cybernetics, Band SMC-13, Nr. 3, S. 257-266, 1983
- Rasshofer, R.; Gresser, K.:** Rundumsensorik für Fahrerassistenzfunktionen der Zukunft - Herausforderungen und Trends. Sensorik für Fahrerassistenzsysteme. 21./22. September 2006 in Heilbronn, 2006
- Reason, J. T.:** Motion sickness adaptation: a neural mismatch model. In: Journal of the Royal Society of Medicine, Band 71, November 1978, S. 819-829, 1978
- Reichart, G.:** Menschliche Zuverlässigkeit beim Führen von Kraftfahrzeugen. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 22 Nr. 7, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2001

- Reyher, A. v.:** Lidarbasierte Fahrstreifenzuordnung von Objekten für eine Abstandsregelung im Stop&Go-Verkehr. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Nr. 636, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2007
- Reymond, G.; Kemeny, A.; Droulez, J.; Berthoz, A.:** Role of Lateral Acceleration in Curve Driving: Driver Model and Experiments on a Real Vehicle and a Driving Simulator. Band Fall 2001 vol. 43, Nr. 3, S. 483-495, 2001
- Ringbeck, T.; Hagebeuker, B.:** A 3D time of flight camera for object detection. Optical 3-D Measurement Techniques. 09.-12. Juli 2007 in Zürich, Schweiz, 2007
- Sarter, N.; Woods, D.:** How in the World did we ever get into that mode? Mode Error and Awareness in Supervisory Control. In: Human Factors, Band 37, Nr. 1, S. 5-19, 1995
- Saust, F.; Wille, J. M.; Lichte, B.; Maurer, M.:** Autonomous Vehicle Guidance on Braunschweig's Inner Ring Road within the Stadtpilot Project. 2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. 05.-09. Juni 2011 in Baden-Baden, 2011
- Schlick, C. M.; Bruder, R.; Luczak, H. :** Arbeitswissenschaft. Springer Verlag, Heidelberg u.a., 2010
- Schneid, M.:** Entwicklung und Erprobung eines kontaktanalogen Head-up-Displays im Fahrzeug. AUDI Dissertationsreihe, 2009
- Schopper, M.; Koch, H.; Späth, O.; Feldmann, M.:** Radarbasierte Assistenzsysteme. In: ATZ extra- Die neue A-Klasse von Mercedes-Benz, Band 05/2012, S. 82-85, 2012
- Schreiber, M.:** Konzeptionierung und Evaluierung eines Ansatzes zu einer manöverbasierten Fahrzeugführung im Nutzungskontext Autobahnfahrten. 2012
- Sebsadji, Y.; Tarel, J.; Foucher, P.; Charbonnier, P.:** Robust Road Marking Extraction in Urban Environments Using Stereo Images. 2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. 21.-24.06.2010 in San Diego, 2010
- Sheridan, T. B.; Verplank, W. L.:** Human and Computer Control of Undersea Teleoperators. 1978
- Sheridan, T.:** Telerobotics, automation, and human supervisory control. In: Cambridge, MA: MIT Press, 1992
- Spannheimer, H.; Heimrath, M.; Wisselmann, D.:** Hochautomatisiertes Fahren - Technologie und Herausforderung. 28. VDI/VW Gemeinschaftstagung Fahrerassistenz und integrierte Sicherheit 2012. 10./11. Oktober 2012 in Wolfsburg, 2012
- Stein, G.; Mano, O.; Shashua, A.:** Vision-based ACC with a Single Camera: Bounds on Range and Range Rate Accuracy. 2003 Intelligent Vehicles Symposium. 9.-11. Juni 2003 in Columbus, OH, USA, 2003

- Steinemann, P.; Klappstein, J.; Dickmann, J.; Wünsche, H.; von Hundelshausen, F.:** 3D Outline Contours of Vehicles in 3D-LIDAR-Measurements for Tracking Extended Targets. 2012 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. 03.-07. Juni 2012 in Alcalá de Henares, Spanien, 2012
- Stiller, C.; Bachmann, A.; Duchow, C.:** Maschinelles Sehen. In: Winner, H.; Hakuli, S.; Wolf, G. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. 2. Auflage. S. 198-222, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012
- Urmson, C.; Anhalt, J.; Bagnell, D.; Baker, C.; Bittner, R.; Clark, M. N.; Dolan, J.; Duggins, D.; Galatali, T.; Geyer, C.; Gittleman, M.; Harbaugh, S.; Hebert, M.; Howard, T. M.; Kolski, S.; Kelly, A.; Likhachev, M.; McNaughton, M.; Miller, N.; Peterson, K.; Pilnick, B.; Rajkumar, R.; Rybski, P.; Salesky, B.; Seo, Y.; Singh, S.; Snider, J.; Stentz, A.; Whittaker, W. ; Wolkowicki, Z.:** Autonomous Driving in Urban Environments: Boss and the Urban Challenge. In: Journal of Field Robotics, Wiley Periodicals, Inc., Band 25(8), S. 425-466, 2008
- Vacek, S.; Schimmel, C.; Dillmann, R.:** Road-marking analysis for autonomous vehicle guidance. 3rd Conference on Mobile Robots ECMR 2007. 19.-21. September 2007 in Freiburg, 2007
- van der Horst, A.:** A time-based analysis of road user behaviour in normal and critical encounters. Technische Universiteit Delft, 1990
- Vanholme, B.; Gruyer, D.; Glaser, S.; Mammar, S.:** A Legal Safety Concept for Highly Automated Driving on Highways. 2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. 05.-09. Juni 2011 in Baden-Baden, 2011
- Vogt, W. P.; Johnson, R. B.:** Dictionary of statistics & methodology. SAGE Publications, Inc., 2011
- Vollrath, M.; Briest, S.; Schießl, C.; Drewes, J.; Becker, U.:** Ableitung von Anforderungen an Fahrerassistenzsysteme aus Sicht der Verkehrssicherheit. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Heft F 60, 2006
- Wagner, F.:** An Evaluation of Fundamental Driver Decisions and Reactions at an Intersection. Highway Research Record, Transportation Research Board 118. 1966
- Waldmann, P.; Niehues, D.:** Der BMW TrackTrainer - automatisiertes Fahren im Grenzbereich auf der Nürburgring Nordschleife. 4. Tagung Sicherheit durch Fahrerassistenz. 15.-16. April 2010 in München, 2010
- Wang, M.; Ganjineh, T.; Rojas, R.:** Action Annotated Trajectory Generation for Autonomous Maneuvers on Structured Road Networks. 5th International Conference on Automation, Robotics and Applications. 06.-08. Dezember 2011 in Wellington, Neuseeland, 2011

- Weißgerber, T.; Damböck, D.; Kienle, M.; Bengler, K.:** Auswirkung einer kontaktnalogen Anzeige auf die Querführung hochautomatisierter Fahrzeuge. 28. VDI/VW Gemeinschaftstagung Fahrerassistenz und integrierte Sicherheit 2012. 10./11. Oktober 2012 in Wolfsburg, 2012
- Wickens, C. D.; Hollands, J. G. :** Engineering Psychology and Human Performance. 3. Aufl. Prentice Hall, New Jersey, 1999
- Wilde, G. J. S.:** The Theory of Risk Homeostasis: Implications for Safety and Health. In: Risk Analysis, Band 2, Nr. 4, S. 209-225, 1982
- Willumeit, P.; Jürgensohn, T.:** Fahrermodelle - ein kritischer Überblick. In: Automobiltechnische Zeitschrift, Nr. 99, S. 424-428, 1999
- Winner, H.:** Die lange Entwicklung von ACC. Workshop Fahrerassistenzsysteme. 22.-24. September 2003 in Leinsweiler, 2003
- Winner, H.; Heuss, O.:** X-by-Wire Betätigungselemente - Überblick und Ausblick. In: Winner, H.; Landau, K. (Hrsg.): Darmstädter Kolloquium Mensch + Fahrzeug 2005. Cockpits für Straßenfahrzeuge der Zukunft. Ergonomia Verlag, Stuttgart, 2005
- Winner, H.; Wolf, G.; Weitzel, A.:** Freigabefälle des Autonomen Fahrens. 15. VDI-Tagung: Erprobung und Simulation in der Fahrzeugentwicklung. 16./17. November 2010 in Baden-Baden, 2010
- Winner, H.:** Radarsensorik. In: Winner, H.; Hakuli, S.; Wolf, G. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. 2. Auflage. S. 123-171, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012
- Winner, H.; Hakuli, S.; Wolf, G. :** Handbuch Fahrerassistenzsysteme. 2. Auflage. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012
- Winner, H.; Weitzel, A.:** Quo vadis, FAS? In: Winner, H.; Hakuli, S.; Wolf, G. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. 2. Auflage. S. 658-667, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012
- Winner, H.; Geyer, S.; Sefati, M.:** Maße für den Sicherheitsgewinn von Fahrerassistenzsystemen. In: Winner, H.; Bruder, Ralph (Hrsg.): Maßstäbe des sicheren Fahrens. 6. Darmstädter Kolloquium Mensch + Fahrzeug 2013. Ergonomia Verlag, Stuttgart, 2013
- Zlocki, A.:** Vorausschauendes ACC zur Steigerung der Energieeffizienz von Hybridfahrzeugen. 4. Tagung Sicherheit durch Fahrerassistenz. 15.-16. April 2010 in München, 2010

Eigene Veröffentlichungen

Geyer, S.; Baltzer, M.; Franz, B.; Hakuli, S.; Kauer, M.; Kienle, M.; Meier, S.; Weißgerber, T.; Bengler, K.; Bruder, R.; Flemisch, F. O.; Winner, H.: Concept and Development of a Unified Ontology for Generating Test and Use Case Catalogues for Assisted and Automated Vehicle Guidance. IET Intelligent Transport Systems. Zur Veröffentlichung angenommen. 2013

Geyer, S.: Maneuver-based vehicle guidance based on the Conduct-by-Wire principle. In Maurer, M.; Winner, H. (Hrsg.): Automotive Systems Engineering. Springer Verlag, Berlin u.a., 2013

Winner, H.; Geyer, S.; Sefati, M.: Maße für den Sicherheitsgewinn von Fahrerassistenzsystemen. In: Winner, H., Bruder, R. (Hrsg.): Maßstäbe des sicheren Fahrens. 6. Darmstädter Kolloquium Mensch + Fahrzeug 2013. Ergonomia Verlag, Stuttgart, 2013

Geyer, S.; Karg, M.; Hakuli, S.; Winner, H.; Franz, B.; Kauer, M.: Temporal Analysis of the Gate Concept as Enabler for Highly Automated Driving based on the Conduct-by-Wire Approach. 2012 IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems ITSC. 16.-19. September 2012 in Anchorage, AK, USA, 2012

Franz, B.; Kauer, M.; Bruder, R.; Geyer, S.: pieDrive – a New Driver-Vehicle Interaction Concept for Maneuver-Based Driving. 2012 International IEEE Intelligent Vehicles Symposium Workshops. 3. Juni 2012 in Alcalá de Henares, Spanien, 2012

Geyer, S.; Hakuli, S.; Winner, H.; Franz, B.; Kauer, M.: Ermittlung der Anforderungen an die Umfelderkennung für Conduct-by-Wire. 5. Tagung Fahrerassistenz. 15.-16. Mai 2012 in München, 2012

Winner, H.; Geyer, S.: Challenges for automotive engineering. In: Public Service Review: European Science & Technology, issue 14, S. 230-231, 2012

Kauer, M.; Franz, B.; Schreiber, M.; Bruder, R.; Geyer, S.: User acceptance of cooperative maneuver-based driving – a summary of three studies. In: Work: A Journal of Prevention, Assessment and Rehabilitation, Band 41, Nr. 1, S. 4258-4264, 2012

Franz, B.; Kauer, M.; Blanke, A.; Schreiber, M.; Bruder, R.; Geyer, S.: Comparison of two human-machine-interfaces for cooperative maneuver-based driving. In: Work: A Journal of Prevention, Assessment and Rehabilitation, Band 41, Nr. 1, S. 4192-4199, 2012

Franz, B.; Kauer, M.; Schreiber, M.; Blanke, A.; Distler, S.; Bruder, R.; Geyer, S.: Maneuver-Based Driving Today and in the Future - Development of a New Human-Machine Interface for Conduct-by-Wire. VDI-Tagung Fahrer im 21. Jahrhundert 2011. 08./09. November 2011 in Braunschweig, 2011

Geyer, S.; Hakuli, S.; Winner, H.; Franz, B.; Kauer, M.: Development of a Cooperative System Behavior for a Highly Automated Vehicle Guidance Concept based on the Conduct-by-Wire Principle. 2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. 05.-09. Juni 2011 in Baden-Baden, 2011

Hakuli, S.; Geyer, S.; Winner, H.; Henning, J.: Integrated Concept for Maneuver-based Driver Assistance. In: ATZ worldwide, Issue 03/2011, 2011.

Hakuli, S.; Geyer, S.; Winner, H.; Henning, J.: Integriertes Konzept für die manöverbasierte Fahrerassistenz. In: ATZ Automobiltechnische Zeitschrift, 03/2011, S. 220-223, 2011

Kauer, M.; Schreiber, M.; Franz, B.; Hakuli, S.; Geyer, S.; Eggers, D.; Bruder, R.: Nutzungsszenarien der manöverbasierten Fahrzeugführung. GfA-Frühjahrskongress 2011. 23.-25. März 2011 in Chemnitz, 2011

Franz, B.; Schreiber, M.; Kauer, M.; Geyer, S.; Bruder, R.: Konzeption eines kontaktanalogen Head-up-Displays für Fahrerassistenzsysteme am Beispiel Conduct-by-Wire. GfA-Frühjahrskongress 2011. 23.-25. März 2011 in Chemnitz, 2011

Winner, H.; Geyer, S.: Fahrerunterstützung im Nutzfahrzeug. 2. Fachkonferenz Elektrik und Elektronik im Nutzfahrzeug. 13./14. Oktober 2010 in Baden-Baden, 2010

Hakuli, S.; Geyer, S.; Winner, H.; Kauer, M.; Schreiber, M.: Systematic Development of Manoeuvre-Based Driver Assistance Functions for Conduct-by-Wire with IPG CarMaker. apply & innovate 2010. 15.-16. September 2010 in Ettlingen/Karlsruhe, 2010

Winner, H.; Geyer, S.; Hakuli, S.: Verfahren zur Steuerung eines Fahrerassistenzsystems und Fahrerassistenzsystem. Europäische Patentanmeldung EP 2216197A1, 2010.

Hakuli, S.; Kluin, M.; Geyer, S.; Winner, H.: Development and Validation of Manoeuvre-Based Driver Assistance Functions for Conduct-by-Wire with IPG CarMaker, FISITA 2010 World Automotive Congress, 30. Mai – 04. Juni 2010 in Budapest, Ungarn, 2010

Winner, H.; Fecher, N.; Geyer, S.: Umwelt- und ressourcenschonende Fahrzeugtechnik im Überblick. 7. Hessischer Mobilitätskongress. 18. September 2009 in Frankfurt a.M., 2009

Winner, H.; Fecher, N.; Geyer, S.: Ansätze der Fahrzeugtechnik zur Reduzierung der Umweltbelastungen im Straßenverkehr. 1. Darmstädter Ingenieurkongress - Bau und Umwelt. 14./15. September 2009 in Darmstadt, 2009

Betreute studentische Arbeiten

Aouini, Rachid: Verifikation der Anforderungen an die maschinelle Umfelderkennung für Conduct-by-Wire mit IPG CarMaker. Bachelor-Thesis Nr. 1105/12, 2012

Bensch, Valerie: Durchführung einer Potentialanalyse zur Fahrerabsichtsdetektion in innerstädtischen Fahrsituationen. Master-Thesis Nr. 498/12, 2012

Busse, Alexander: Literaturrecherche zum Kraftstoffeinsparpotential durch Fahrerassistenzsysteme. Bachelor-Thesis Nr. 1036/10, 2010

Cao, Peng: Konzeption und Implementierung eines Sensorfusionsmodells zur Umfelderkennung in IPG CarMaker. Master-Thesis Nr. 504/12, 2012

Dyroff, Moritz; Wenzel, Sören; Wiebel, Christopher: Entwicklung eines Bedienkonzepts für Interactive Longitudinal Control (ILoC). Advanced Design Project Nr. 24/08, 2008

Jorns, Michael: Untersuchung der Eignung existierender Fahrermodelle für die hochautomatisierte Fahrzeugführung. Studienarbeit Nr. 1101/12, 2012

Jow, Yun Chen: Bewertung der Übertragbarkeit von Verfahren zur Trajektorienplanung aus anderen Technikfeldern auf Conduct-by-Wire. Bachelor-Thesis Nr. 1043/10, 2010

Kalbfleisch, Jonas: Übertragung des menschlichen Fahrerverhaltens an Entscheidungspunkten auf das Verhalten der Conduct-by-Wire-Automation. Bachelor-Thesis Nr. 1120/12, 2012

Kapp, Jonas: Untersuchung von Systemverhaltensstrategien für Conduct-by-Wire. Bachelor-Thesis Nr. 1067/11, 2011

Karg, Melanie: Zeitliche Analyse der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion bei Conduct-by-Wire. Bachelor-Thesis Nr. 1092/11, 2011

Khan, Raffey: Funktionsorientierte Entwicklung eines Bedienkonzepts für Conduct-by-Wire. Bachelor-Thesis Nr. 1039/10, 2010

Leupold, Florian: Analyse realisierter Architekturen zur maschinellen Umfelderkennung bei autonomen Fahrzeugführungskonzepten. Bachelor-Thesis Nr. 1065/11, 2011

McDougall, Andrea: Test Scenarios for Conduct-by-Wire. US National Science Foundation Research Experience for Undergraduates Project, 2011

Munz, Ryan: Entwicklung einer Methodik zur systematischen Analyse der Systemgrenzen von Conduct-by-Wire in IPG CarMaker. Bachelor-Thesis Nr. 1075/11, 2011

Nozinovic, Mirsad: Entwicklung, Implementierung und Validierung einer „Einscheren vorbereiten“-Funktion für Conduct-by-Wire. Studienarbeit Nr. 1049/10, 2010

Pfeifer, Roman: Ermittlung einer Methodik zur systematischen Generierung von Anwendungsszenarien für ein Fahrerassistenz- und Fahrsicherheitssystem. Studienarbeit Nr. 1085/11, 2011

Scheffler, Alexander: Implementierung und Validierung einer Notausweichfunktionalität im Rahmen des CbW-Frameworks. Studienarbeit Nr. 1104/12, 2011

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Sebastian Geyer
Geburtsdatum: 24. September 1982
Geburtsort: München

Schulzeit

1989 – 1993 Grundschule Philipp-Weiß in Fürstenfeldbruck
1993 – 1994 Viscardi-Gymnasium in Fürstenfeldbruck
1994 – 1996 Cité Scolaire Internationale de Lyon, Frankreich
1996 – 1998 Gymnasium Kreuzgasse in Köln
1998 – 2002 Rabanus-Maurus-Gymnasium in Mainz
Abschluss: Abitur

Studium

2002 – 2007 Studium Allgemeiner Maschinenbau
Technische Universität Darmstadt und Ecole
Polytechnique Fédérale de Lausanne, Schweiz
Abschluss: Diplom-Ingenieur

Berufstätigkeit

2008 – 2013 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Fahrzeug-
technik der Technischen Universität Darmstadt